

www.aurora-group.eu

ISSN 2453-8922

www.nbpublish.com

АРКТИКА и АНТАРКТИКА

AURORA Group s.r.o.
nota bene

Выходные данные

Номер подписан в печать: 22-04-2023

Учредитель: Даниленко Василий Иванович, w.danilenko@nbpublish.com

Издатель: ООО <НБ-Медиа>

Главный редактор: Васильчук Юрий Кириллович, доктор геолого-минералогических наук,
vasilch_geo@mail.ru

ISSN: 2453-8922

Контактная информация:

Выпускающий редактор - Зубкова Светлана Вадимовна

E-mail: info@nbpublish.com

тел.+7 (966) 020-34-36

Почтовый адрес редакции: 115114, г. Москва, Павелецкая набережная, дом 6А, офис 211.

Библиотека журнала по адресу: http://www.nbpublish.com/library_tariffs.php

Publisher's imprint

Number of signed prints: 22-04-2023

Founder: Danilenko Vasiliy Ivanovich, w.danilenko@nbpublish.com

Publisher: NB-Media ltd

Main editor: Vasil'chuk Yuriy Kirillovich, doktor geologo-mineralogicheskikh nauk,
vasilch_geo@mail.ru

ISSN: 2453-8922

Contact:

Managing Editor - Zubkova Svetlana Vadimovna

E-mail: info@nbpublish.com

тел.+7 (966) 020-34-36

Address of the editorial board : 115114, Moscow, Paveletskaya nab., 6A, office 211 .

Library Journal at : http://en.nbpublish.com/library_tariffs.php

Редакционный совет

Васильчук Юрий Кириллович - председатель редакционного совета, доктор геолого-минералогических наук, действительный член Российской академии естественных наук, профессор кафедры геохимии и ландшафтов и географии почв Географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.
119234, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, Главный корпус МГУ, сектор "А", ауд 2009, vasilch_geo@mail.ru

Алексеев Сергей Владимирович – доктор геолого-минералогических наук, заведующий отделом гидрогеологии, Институт земной коры СО РАН Институт земной коры СО РАН,
664033, Россия, г.Иркутск, ул. Лермонтова, 128

Брушков Анатолий Викторович - доктор геолого-минералогических наук, зав. кафедрой геокриологии, геологический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.
Главное здание МГУ им. М.В.Ломоносова, ул. Ленинские Горы, 1, сектор А, 3 этаж, г. Москва, Россия, 119234.

Буданцева Надежда Аркадьевна - кандидат географических наук, старший научный сотрудник, географический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.
Главное здание МГУ им. М.В.Ломоносова, ул. Ленинские Горы, 1, сектор А, 17 и 21 этаж, г. Москва, Россия, 119234.

Бычков Андрей Юрьевич - доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геохимии, геологический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.
МГУ им. М.В.Ломоносова, ул. Ленинские Горы, 1, г. Москва, Россия, 119234.

Васильчук Алла Константиновна - доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, географический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.
Главное здание МГУ им. М.В.Ломоносова, Ленинские Горы, 1, сектор Ж, 9 этаж, лаборатория геоэкологии Севера, г. Москва, Россия, 119234. alla-vasilch@yandex.ru

Власов Александр Николаевич - доктор технических наук, директор Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт прикладной механики Российской академии наук (ИПРИМ РАН).
125040, Россия, Москва, Ленинградский проспект д.7.

Дроздов Дмитрий Степанович - доктор геолого-минералогических наук, Заместитель директора Института криосферы Земли СО РАН,
Москва, Вавилова, 30/6, комн.22, 119991.

Кирпотин Сергей Николаевич - доктор биологических наук, профессор Томского государственного университета, директор Центра исследований биоты, климата и ландшафта BioClimLand.
Просп. Ленина, дом. 36. Томск, Россия, 634050.

Кислов Александр Викторович - доктор географических наук, действительный член Российской академии естественных наук, профессор, зав. кафедрой метеорологии и климатологии, географический факультет Московского государственного университета

имени М.В.Ломоносова.

Главное здание МГУ им. М.В.Ломоносова, ул. Ленинские Горы, 1, сектор А, 20 этаж, г. Москва, Россия, 119234.

Михаленко Владимир Николаевич - доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, институт географии РАН (ИГ РАН).

Старомонетный переулок, дом 29 г. Москва, Россия, 119017.

Рогов Виктор Васильевич - доктор географических наук, профессор кафедры криолитологии и гляциологии, географический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Главное здание МГУ им. М.В.Ломоносова, ул. Ленинские Горы, 1, сектор А, 19 этаж, г. Москва, Россия, 119234.

Фролова Наталья Леонидовна - доктор географических наук, профессор, зав. кафедрой гидрологии, географический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Главное здание МГУ им. М.В.Ломоносова, ул. Ленинские Горы, 1, сектор А, 17 этаж, г. Москва, Россия, 119234.

Хименков Александр Николаевич - кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник.

Институт геоэкологии РАН им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН). Уланский переулок, дом 13, строение 2, а/я 145. г. Москва, Россия, 101000.

Чижова Юлия Николаевна - кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН),

г. Москва, ул. Старомонетный переулок д. 17, 109017

Алексеев Сергей Владимирович - доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Заведующий лабораторией гидрогеологии, 664033, Россия, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, каб. 318, salex@crust.irk.ru

Галкин Александр Фёдорович - доктор технических наук, Институт мерзлотоведения им.П.И.Мельникова СО РАН, Главный научный сотрудник, 677010, Россия, республика Саха(Якутия), г. Якутск, ул. Кулаковского, 4-1, afgalkin@yandex.ru

Луговской Александр Михайлович - доктор географических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), профессор кафедры географии факультета картографии и геоинформатики, 1090548, Россия, Московская область, г. Москва, ул. Шоссейная, 13, оф. 49, alug1961@yandex.ru

Яковенко Наталия Владимировна - доктор географических наук, ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, директор НИИ ИТЛК, 394068, Россия, Воронежская область, г. Voronezh, бул. Олимпийский, 6, кв. 334, n.v.yakovenko71@gmail.com

Council of Editors

Vasilchuk Yuri Kirillovich - Chairman of the Editorial Board, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, full member of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor of the Department of Geochemistry and Landscapes and Soil Geography of the Geographical Faculty of Lomonosov Moscow State University.

119234, Russia, Moscow, Leninskie Gory str., 1, Main Building of Moscow State University, sector "A", aud 2009, vasilch_geo@mail.ru

Alekseev Sergey Vladimirovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Department of Hydrogeology, Institute of the Earth's Crust SB RAS Institute of the Earth's Crust SB RAS,

664033, Russia, G.Irkutsk, ul. Lermontov, 128

Brushkov Anatoly Viktorovich - Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Department of Geocryology, Geological Faculty of Lomonosov Moscow State University.

The main building of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory str., 1, Sector A, 3rd floor, Moscow, Russia, 119234.

Budantseva Nadezhda Arkadyevna - Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University.

The main building of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory str., 1, Sector A, 17th and 21st floor, Moscow, Russia, 119234.

Andrey Yuryevich Bychkov - Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor of the Department of Geochemistry, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University.

Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory str., 1, Moscow, Russia, 119234.

Vasilchuk Alla Konstantinovna - Doctor of Geographical Sciences, Leading Researcher, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University.

The main building of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, sector Z, 9th floor, Laboratory of Geoecology of the North, Moscow, Russia, 119234. alla-vasilch@yandex.ru

Vlasov Alexander Nikolaevich - Doctor of Technical Sciences, Director of the Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPRIM RAS).

7 Leningradsky Prospekt, Moscow, 125040, Russia.

Drozdov Dmitry Stepanovich - Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Deputy Director of the Institute of the Earth's Cryosphere SB RAS,

Moscow, Vavilova, 30/6, room.22, 119991.

Kirpotin Sergey Nikolaevich - Doctor of Biological Sciences, Professor of Tomsk State University, Director of the Center for Biota, Climate and Landscape Research BioClimLand. Avenue. Lenin's house. 36. Tomsk, Russia, 634050.

Alexander V. Kislov - Doctor of Geographical Sciences, Full member of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor, Head of the Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University.

The main building of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory str., 1, Sector A, 20th floor, Moscow, Russia, 119234.

Mikhalenko Vladimir Nikolaevich - Doctor of Geographical Sciences, Leading Researcher,

Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (IG RAS).
29 Staromonetny Lane, Moscow, Russia, 119017.

Rogov Viktor Vasilyevich - Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of Cryolithology and Glaciology, Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University.
The main building of Lomonosov Moscow State University,
Leninskie Gory str., 1, sector A, 19th floor, Moscow, Russia, 119234.

Frolova Natalia Leonidovna - Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Department of Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University.
The main building of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory str., 1, sector A, 17th floor, Moscow, Russia, 119234.

Khimenkov Alexander Nikolaevich - Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, leading researcher.
E.M. Sergeev Institute of Geoecology of the Russian Academy of Sciences (IGE RAS). Ulansky lane, building 13, building 2, a/z 145. Moscow, Russia, 101000.

Yulia Nikolaevna Chizhova - Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS),
Moscow, 17 Staromonetny pereulok str., 109017

Alekseev Sergey Vladimirovich - Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory of Hydrogeology, 664033, Russia, Irkutsk region, Irkutsk, 128 Lermontov str., office 318, salex@crust.irk.ru

Galkin Alexander Fedorovich - Doctor of Technical Sciences, Institute of Permafrost named after P.I. Melnikov SB RAS, Chief Researcher, 677010, Russia, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Kulakovsky str., 4-1, afgalkin@yandex.ru

Lugovskoy Alexander Mikhailovich - Doctor of Geographical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State University of Geodesy and Cartography" (MIIGAik), Professor of the Department of Geography, Faculty of Cartography and Geoinformatics, 1090548, Russia, Moscow region, Moscow, Shosseynaya str., 13, office 49, alug1961@yandex.ru

Yakovenko Natalia Vladimirovna - Doctor of Geographical Sciences, G.F. Morozov VGLTU, Director of ITLK Research Institute, 394068, Russia, Voronezh Region, Voronezh, blvd. Olympic, 6, sq. 334, n.v.yakovenko71@gmail.com

Требования к статьям

Журнал является научным. Направляемые в издательство статьи должны соответствовать тематике журнала (с его рубрикаторм можно ознакомиться на сайте издательства), а также требованиям, предъявляемым к научным публикациям.

Рекомендуемый объем от 12000 знаков.

Структура статьи должна соответствовать жанру научно-исследовательской работы. В ее содержании должны обязательно присутствовать и иметь четкие смысловые разграничения такие разделы, как: предмет исследования, методы исследования, апелляция к оппонентам, выводы и научная новизна.

Не приветствуется, когда исследователь, трактуя в статье те или иные научные термины, вступает в заочную дискуссию с авторами учебников, учебных пособий или словарей, которые в узких рамках подобных изданий не могут широко излагать свое научное воззрение и заранее оказываются в проигрышном положении. Будет лучше, если для научной полемики Вы обратитесь к текстам монографий или диссертационных работ оппонентов.

Не превращайте научную статью в публицистическую: не наполняйте ее цитатами из газет и популярных журналов, ссылками на высказывания по телевидению.

Ссылки на научные источники из Интернета допустимы и должны быть соответствующим образом оформлены.

Редакция отвергает материалы, напоминающие реферат. Автору нужно не только продемонстрировать хорошее знание обсуждаемого вопроса, работ ученых, исследовавших его прежде, но и привнести своей публикацией определенную научную новизну.

Не принимаются к публикации избранные части из диссертаций, книг, монографий, поскольку стиль изложения подобных материалов не соответствует журнальному жанру, а также не принимаются материалы, публиковавшиеся ранее в других изданиях.

В случае отправки статьи одновременно в разные издания автор обязан известить об этом редакцию. Если он не сделал этого заблаговременно, рискует репутацией: в дальнейшем его материалы не будут приниматься к рассмотрению.

Уличенные в плагиате попадают в «черный список» издательства и не могут рассчитывать на публикацию. Информация о подобных фактах передается в другие издательства, в ВАК и по месту работы, учебы автора.

Статьи представляются в электронном виде только через сайт издательства <http://www.e-notabene.ru> кнопка "Авторская зона".

Статьи без полной информации об авторе (соавторах) не принимаются к рассмотрению, поэтому автор при регистрации в авторской зоне должен ввести полную и корректную информацию о себе, а при добавлении статьи - о всех своих соавторах.

Не набирайте название статьи прописными (заглавными) буквами, например: «ИСТОРИЯ КУЛЬТУРЫ...» — неправильно, «История культуры...» — правильно.

При добавлении статьи необходимо прикрепить библиографию (минимум 10–15 источников, чем больше, тем лучше).

При добавлении списка использованной литературы, пожалуйста, придерживайтесь следующих стандартов:

- [ГОСТ 7.1-2003 Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.](#)
- [ГОСТ 7.0.5-2008 Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления](#)

В каждой ссылке должен быть указан только один диапазон страниц. В теле статьи ссылка на источник из списка литературы должна быть указана в квадратных скобках, например, [1]. Может быть указана ссылка на источник со страницей, например, [1, с. 57], на группу источников, например, [1, 3], [5-7]. Если идет ссылка на один и тот же источник, то в теле статьи нумерация ссылок должна выглядеть так: [1, с. 35]; [2]; [3]; [1, с. 75-78]; [4]....

А в библиографии они должны отображаться так:

[1]

[2]

[3]

[4]....

Постраничные ссылки и сноски запрещены. Если вы используете сноску, не содержащую ссылку на источник, например, разъяснение термина, включите сноску в текст статьи.

После процедуры регистрации необходимо прикрепить аннотацию на русском языке, которая должна состоять из трех разделов: Предмет исследования; Метод, методология исследования; Новизна исследования, выводы.

Прикрепить 10 ключевых слов.

Прикрепить саму статью.

Требования к оформлению текста:

- Кавычки даются уголками (« ») и только кавычки в кавычках — лапками (" ").
- Тире между датами дается короткое (Ctrl и минус) и без отбивок.
- Тире во всех остальных случаях дается длинное (Ctrl, Alt и минус).
- Даты в скобках даются без г.: (1932–1933).
- Даты в тексте даются так: 1920 г., 1920-е гг., 1540–1550-е гг.
- Недопустимо: 60-е гг., двадцатые годы двадцатого столетия, двадцатые годы XX столетия, 20-е годы XX столетия.
- Века, король такой-то и т.п. даются римскими цифрами: XIX в., Генрих IV.
- Инициалы и сокращения даются с пробелом: т. е., т. д., М. Н. Иванов. Неправильно: М.Н. Иванов, М.Н. Иванов.

ВСЕ СТАТЬИ ПУБЛИКУЮТСЯ В АВТОРСКОЙ РЕДАКЦИИ.

По вопросам публикации и финансовым вопросам обращайтесь к администратору
Зубковой Светлане Вадимовне

E-mail: info@nbpublish.com

или по телефону +7 (966) 020-34-36

Подробные требования к написанию аннотаций:

Аннотация в периодическом издании является источником информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах исследований.

Аннотация выполняет следующие функции: дает возможность установить основное

содержание документа, определить его релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту документа; используется в информационных, в том числе автоматизированных, системах для поиска документов и информации.

Аннотация к статье должна быть:

- информативной (не содержать общих слов);
- оригинальной;
- содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований);
- структурированной (следовать логике описания результатов в статье);

Аннотация включает следующие аспекты содержания статьи:

- предмет, цель работы;
- метод или методологию проведения работы;
- результаты работы;
- область применения результатов; новизна;
- выводы.

Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации. Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...», «в статье рассматривается...»).

Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в аннотации не приводятся.

В тексте аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций.

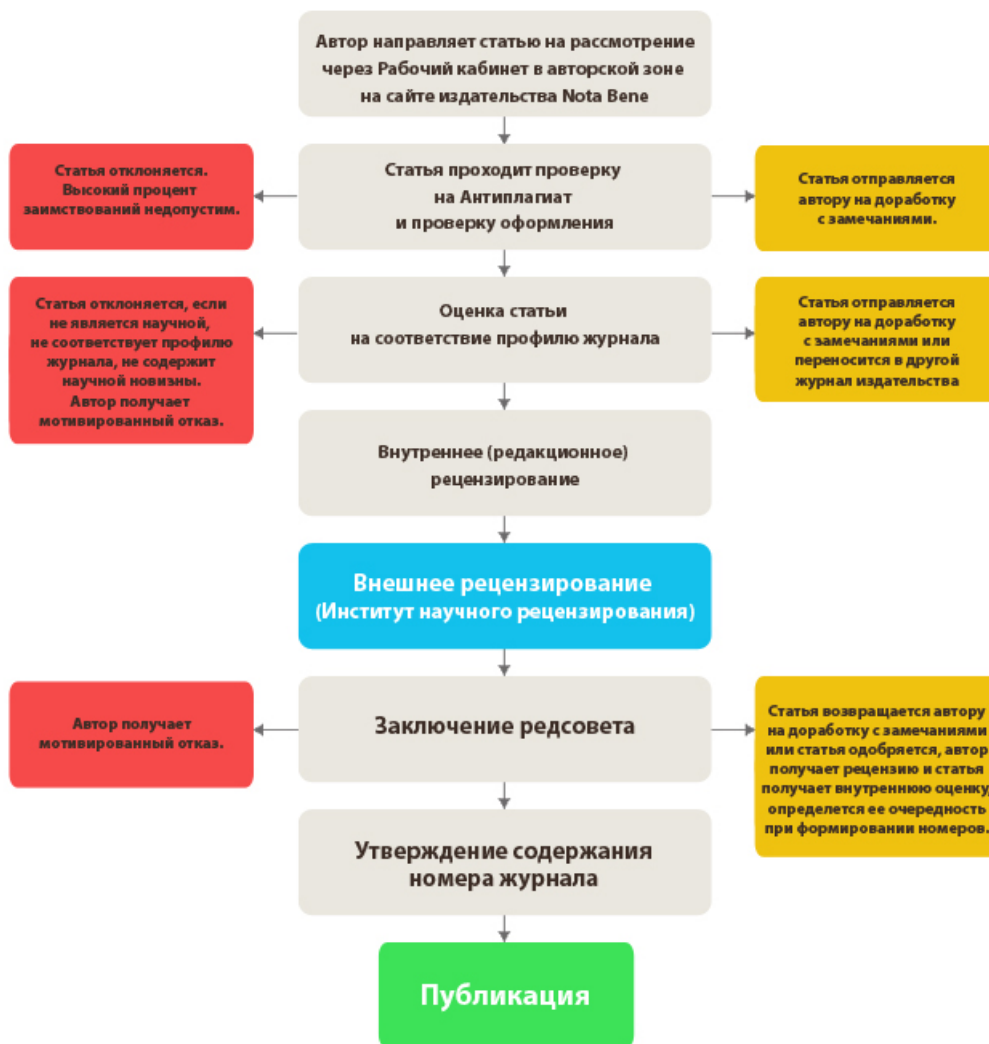
Гонорары за статьи в научных журналах не начисляются.

Материалы журналов включены:

- в систему Российского индекса научного цитирования;
- отображаются в крупнейшей международной базе данных периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, что гарантирует значительное увеличение цитируемости;
- Всем статьям присваивается уникальный идентификационный номер Международного регистрационного агентства DOI Registration Agency. Мы формируем и присваиваем всем статьям и книгам, в печатном, либо электронном виде, оригинальный цифровой код. Префикс и суффикс, будучи прописанными вместе, образуют определяемый, цитируемый и индексируемый в поисковых системах, цифровой идентификатор объекта — digital object identifier (DOI).

[Отправить статью в редакцию](#)

Этапы рассмотрения научной статьи в издательстве NOTA BENE.



Содержание

Фролов Д.М., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Кошурников А.В., Гагарин В.Е. Криологические исследования на метеоплощадке МГУ зимой 2022/23 года	1
Сулейманов А.А. Из истории геокриологического изучения прибрежно-шельфовой зоны морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в 1950–1980-е гг.	14
Хименков А.Н., Кошурников А.В., Дернова Е.О. Газонасыщенные мёрзлые породы, как объект изучения геокриологии	26
Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П. Латеральная и радиальная дифференциация химического состава криогенных почв долины реки Вилуй, Центральная Якутия	65
Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П. Латеральная и радиальная дифференциация геохимического состава криогенных почв учебно-научного полигона Хановой, Большеземельская тундра	88
Англоязычные метаданные	116

Contents

Frolov D.M., Seliverstov Y.G., Sokratov S.A., Koshurnikov A.V., Gagarin V.E. Investigation of the Spatio-Temporal Heterogeneity of Snow Thickness at the Meteorological Site of the Lomonosov MSU in the Winter of 2022/2023	1
Suleimanov A.A. The History of Geocryological Study of the Coastal-Shelf Zone of the Laptev and East Siberian Seas in the 1950s–1980s	14
Khimenkov A.N., Koshurnikov A.V., Dernova E.O. Gas-saturated frozen rocks as an object of geocryology study	26
Vasil'chuk Y.K., Ginzburg A.P. Lateral and Radial Differentiation of Cryogenic Soils Chemical Composition in the Vilyuy River valley, Central Yakutia	65
Vasil'chuk Y.K., Ginzburg A.P. Lateral and radial differentiation of cryogenic soils geochemical composition in the Khanovei scientific and educational field site, Bolshezemel'skaya tundra	88
Metadata in english	116

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Фролов Д.М., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Кошурников А.В., Гагарин В.Е. — Криологические исследования на метеоплощадке МГУ зимой 2022/23 года // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 1. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.1.40448 EDN: PGRHXP URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=40448

Криологические исследования на метеоплощадке МГУ зимой 2022/23 года

Фролов Денис Максимович

научный сотрудник, Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 1904Б

✉ denisfrolov@mail.ru



Селиверстов Юрий Германович

научный сотрудник, Географический ф-т МГУ

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 1904Б

✉ yus5@yandex.ru



Сократов Сергей Альфредович

ORCID: 0000-0001-9265-2935

кандидат географических наук

доцент, кафедра криолитологии и гляциологии, Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1

✉ sokratov@geogr.msu.ru



Кошурников Андрей Викторович

кандидат геолого-минералогических наук

ведущий научный сотрудник кафедры геоэкологии, Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 205

✉ koshurnikov@msu-geophysics.ru



Гагарин Владимир Евгеньевич

кандидат геолого-минералогических наук

старший научный сотрудник кафедры геоэкологии, Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, ауд. Ц23

✉ gagar88@yandex.ru



[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2023.1.40448

EDN:

PGRHXP

Дата направления статьи в редакцию:

14-04-2023

Дата публикации:

22-04-2023

Аннотация: В работе представлены результаты полевых исследований, проведенных на метеоплощадке МГУ за зимний период 2022/2023. Целью наблюдений являлось изучение развития снежной толщи и ее пространственной изменчивости за один зимний сезон. Полевые исследования заключались в анализе стратиграфических слоев снежной толщи и измерении их плотности. Полученные данные позволили охарактеризовать и оценить изменения снежных слоев, их структуру и плотность в пространственно-временном отношении. Результаты работы отображены на графиках пространственно-временной изменчивости снежного покрова за 2022/2023, проанализирована эволюция снежной толщи за зимний период. Анализ наблюдений отражает действительно высокую пространственную и временную изменчивость снежного покрова зимой, что позволяет не только оценить и сравнить полученные данные с прошлыми исследованиями, но и дополнить и усовершенствовать уже имеющуюся информацию о неоднородности снежного покрова. Полученные данные позволили охарактеризовать и оценить изменения снежных слоев, их структуру и плотность в пространственно-временном отношении. Результаты работы отображены на графиках пространственно-временной изменчивости снежного покрова за 2022/2023, проанализирована эволюция снежной толщи за зимний период. Анализ наблюдений отражает действительно высокую пространственную и временную изменчивость снежного покрова зимой, что позволяет не только оценить и сравнить полученные данные с прошлыми исследованиями, но и дополнить и усовершенствовать уже имеющуюся информацию о неоднородности снежного покрова.

Ключевые слова:

снежный покров, пространственно- временные неоднородности, МГУ, снежная толща, метеоплощадке, зимний сезон, снежный слой, зимний период, исследование, неоднородность снежного покрова

Работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (121051100164-0), «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4).

Введение

К настоящему времени пространственно-временные изменения снежного покрова становится возможным моделировать для различных территорий, основываясь на

полученных ранее данных о физических и стратиграфических свойствах снежной толщи, а также опираясь на метеорологическую информацию по территории. Проводившиеся ранее исследования с использованием современного оборудования и технологий, которые позволили выявить закономерности пространственной изменчивости снежного покрова, дают возможность представлять неоднородность снежной толщи по времени и в пространстве с большой точностью и без необходимости полевых работ (Голубев и др., 2010, Комаров и др., 2018). Однако для проведения наиболее точной верификации результатов всё-таки требуется произведении натурных наблюдений.

Материалы и методы

В недавно опубликованном очередном ежегодном докладе Росгидромета о состоянии климата на территории России в 2022 г. (http://downloads.igce.ru/reports/Doklad_o_klimате_RF_2022_s_podpisiyu_compressed_with_ говорится об ускорение климатических изменений в России. Так в частности 2022 год для России в целом занял 5-е место в ранжированном по убыванию ряду среднегодовых температур с 1936 года, аномалия среднегодовой температуры воздуха (отклонение от среднего за 1991-2020 гг.) составила +0,87°C.

Так зимний период (ноябрь-март) 2022/23 года в Москве был такой же, как и предыдущий (-2,4°C), но теплее чем 2020/21 (13,9°C), но холоднее, чем 2020 (1,4°C) зимний сезон. Далее ещё предыдущие зимние сезоны 2016/17-2018/19 были холоднее (13,46 13,6, 13,1), а 2013/14-2015/16 (11,08, 11,96, 11,88 °C) - были теплее. Зимние сезоны 2009/10-2012/13 (15,66, 15,08, 14,3, 15,1°C) были опять холоднее, чем достаточно средние с учётом потепления 2021/22 и 2022/23 (рис. 1).

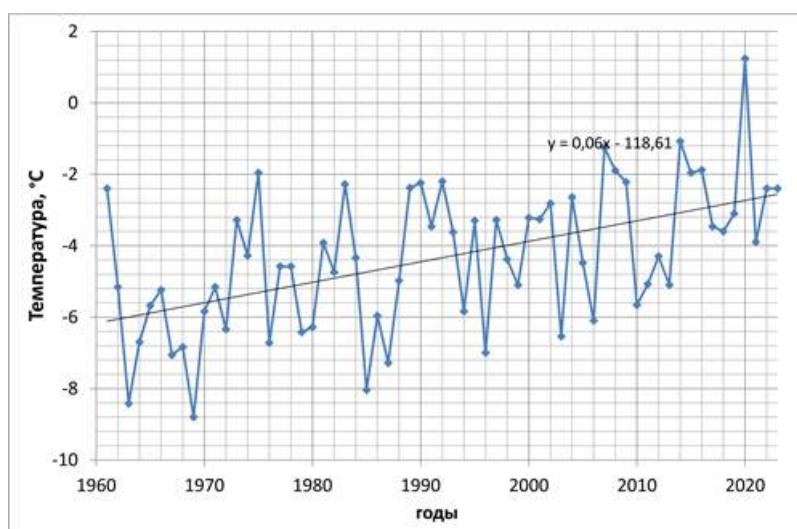


Рис. 1. Средняя температура воздуха зимних месяцев (ноябрь-март) в Москве за 1961-2023 гг.

За зимний период (ноябрь-март) 2022/23 года в Москве выпало достаточно среднее количество осадков (266 мм) (рис. 2). Средняя февральская толщина снежного покрова была также на среднем уровне за последние годы (32 см) (рис.3).

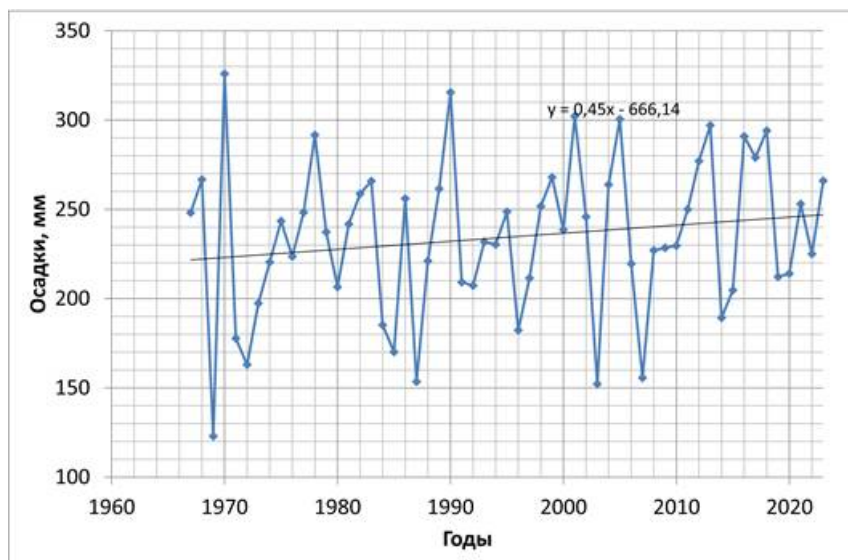


Рис. 2. Изменение суммы осадков зимних месяцев (ноябрь-март) в Москве за 1961-2023 гг.

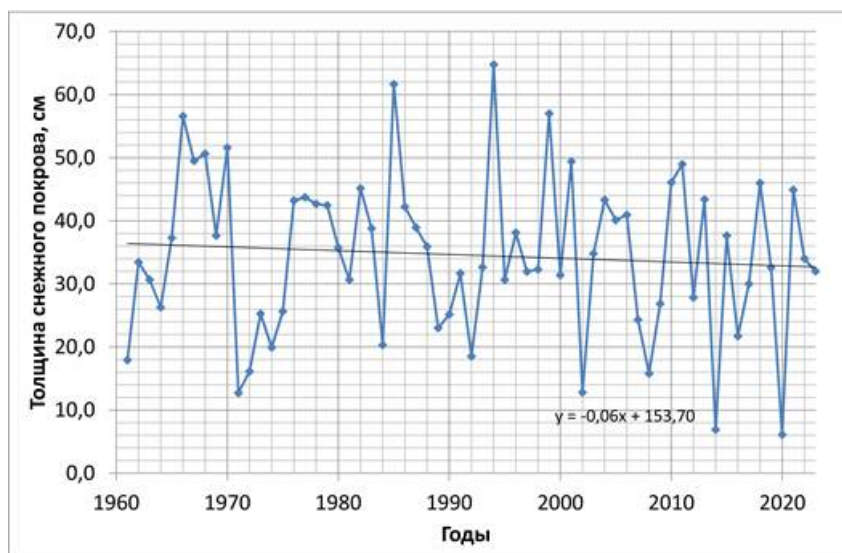


Рис. 3. Изменение средней за февраль толщины снежного покрова в Москве за 1961-2023 гг.

Поэтому в работе представлены результаты полевых исследований, проведенных на метеоплощадке МГУ за зимний период 2022/2023 гг. Целью наблюдений являлось изучение развития снежной толщи и ее пространственной изменчивости за один зимний сезон. Полевые исследования заключались в анализе стратиграфических слоев снежной толщи и измерении их плотности.

Зима 2022-2023 г. оказалась неоднородной по температурному режиму, при относительно близкой к норме среднемесячной температуре декабря. В январе и феврале наблюдалась в основном положительная аномалия температуры на большей части европейской территории страны. В среднем температурный режим декабря оказался близким к среднееголетним значениям. По данным метеостанции ВДНХ в Москве среднемесячная температура декабря была $4,1^{\circ}\text{C}$, что выше климатической нормы на $0,4^{\circ}\text{C}$. Среднемесячная температура января по данным метеостанции ВДНХ в Москве составила $-4,7^{\circ}\text{C}$, что выше климатической нормы на $1,5^{\circ}\text{C}$. Среднемесячная температура февраля в Москве составила $-4,1^{\circ}\text{C}$, что выше климатической нормы на $1,8^{\circ}\text{C}$. Количество осадков примерно соответствовало среднееголетним значениям для

данного периода года, хотя в декабре их было примерно в два раза больше нормы и составило 31,2 мм в ноябре, 111,4 мм в декабре, 28,9 мм в январе и 33,8 мм в феврале (рис. 4).

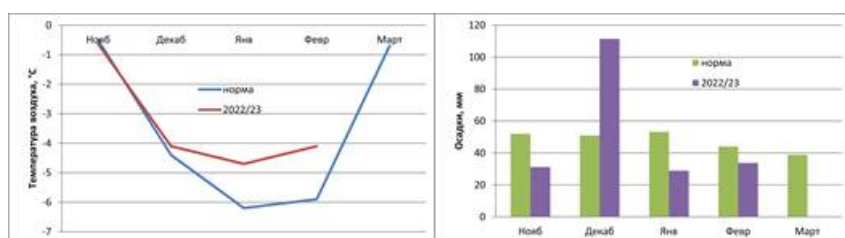


Рис. 4. Изменение температуры воздуха и количества осадков на метеостанции ВДНХ за зимний период 2022/23

Дату 15 ноября 2022 г. можно считать датой установления снежного покрова в Москве в зимний период 2022-2023. Это может быть одна из самых ранних дат установления устойчивого снежного покрова в Москве с начала нового века. Дата самого раннего устойчивого снежного покрова, начиная с 2000 г. — 29 октября 2016 г. Далее следуют 14 ноября 2001 и 2007 гг. и 18 ноября 2004 г. Таким образом снежный покров в зимний сезон 2020/2021 установился в середине ноября и пролежал до конца марта. За это время волны холода с опусканием температуры до -10 - -20°C сменялись оттепелями с небольшой положительной температурой порядка трех раз. Изменение температуры воздуха, осадков и толщины снежно покрова за зимний период 2022/23 изображено на рис. 5.



Рис. 5. Изменение температуры воздуха, осадков и толщины снежно покрова по метеостанции ВДНХ за зимний период 2022/23

В связи с обильными декабрьскими снегопадами толщина снежного покрова 22.12.2022 по рейке на метеоплощадке МГУ составила 31 см, что явилось своеобразным рекордом снегонакопления. Дальше в январе и феврале следовали сильные перепады температуры с понижением до -20°C и оттепели, что способствовало возникновению ледяных корок и горизонтов разрыхления глубинной изморози. Почва под снегом не промерзала. Изменение температуры в воздухе и в толще снега показано на рис. 6.

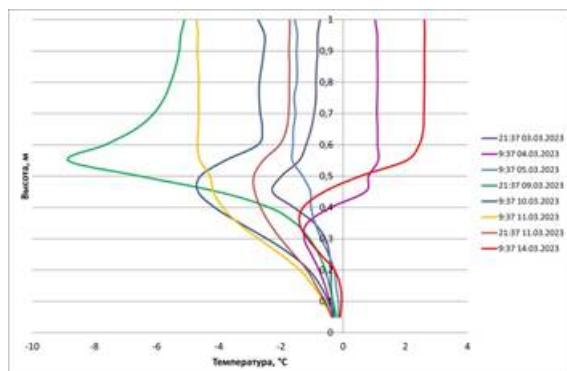


Рис. 6. Изменение температуры в воздухе и в толще снега

На рис. 6 виден температурный минимум на границе снежной толщи и атмосферы за счёт испарения с поверхности снега как в [1-4].

На метеоплощадке МГУ также была пройдена 18-ти метровая скважина с отбором керна. Описание структуры дано в табл. 1.

Таблица 1. Скважина 2021 г. на Метеорологической обсерватории МГУ

Глубина, м	Диагностика	Описание
0-0,24	Дернина и гумусовый горизонт	Запах плесени, структура копковатая, обильные корни, равномерная буровато-серая окраска. Вскипание от HCl10% слабое, фрагментарное (мелкозем).
0,24-0,37	гумусовый горизонт с техногенным по нижней границе	Вскипает от HCl10% по нижней границе по включениям. Включения: угли, кирпич
0,37-0,52	Техногенный горизонт	Турбированный горизонт на основе покровного суглинка. Крупные включения (камни), угли. Фрагменты прокрашенные гумусом, признаки оструктуренности (орехи, призмы) Вскипает от HCl10% по редким карбонатным включениям.
0,52-0,63	Техногенный горизонт	В целом не вскипает
0,62-0,83	Техногенный горизонт	Крупные включения кирпича и др. в перемешанном покровном суглинке, не вскипает от HCl10%
0,83-0,99		Вскипает от HCl10% по включениям
1,08-1,34	То же	Покровный суглинок сизовато бурый с ортштейнами и стяжениями
1,49-1,65	То же	Меньше сизых тонов в окраске
2,13-2,23	Московская морена	На верхней границе керна желтый песок с мелким силикатным щебнем. Ниже красно-кирпичный опесчаненый суглинок

2,23	московская морена	не вскипает от HCl 10% кирпично-красного цвета. Опесчаненный тяжелый суглинок глина? Включения – силикатная дресва, темный щебень – базальт?
2,4-2,61	Московская морена	Кирпично-красного цвета. Опесчаненный тяжелый суглинок глина? Включения – силикатная дресва. Не вскипает от HCl 10%.
3,00-3,84	Порода, Московская Днепровская Морена	Красновато-темно-бурый суглинок с большим количеством карбонатного щебня. Из-за включений и рассеянных карбонатов не очень пластичен. Вскипает от HCl 10% бурно
6м	Порода, Днепровская морена	Красновато-темно-бурый суглинок с большим количеством карбонатного щебня. Вскипает от HCl 10% бурно
7,91-8,03	Порода, Днепровская морена	Коричневый – цвета молочного шоколада, пластичный с белесой редкой дресвой вскипание фрагментарное по включениям
9,2-		Более пластичен, пропитан карбонатами равномерно интенсивно вскипает
9,36-9,63	Палеопочва	Горизонт имеет запах «весенней земли». Окрашен не равномерно. На общем красновато-буром фоне заметны более темные пятна с серым подтоном. Есть карбонатные новообразования в виде псевдомицелия.
9,98-10,13	Палеопочва	Горизонт структурирован – ореховатая структура, темные пленки на гранях структурных отдельностей. Напоминает текстурно-карбонатный горизонт. Включения окатанные карбонатного состава
10,80	Порода, Днепровская морена	Красновато-темно-бурый суглинок с большим количеством карбонатного щебня. Вскипает от HCl 10% бурно
11,92-12,04	Порода, Днепровская морена, в пределах капиллярной каймы обводненного	Бурой окраски. Палевый оттенок окраски и редоксиморфные признаки (ржавые и сизые пятна, стяжения и конкреции железа и марганца). Вскипает средне интенсивно, в основном по крупным включениям, мелкозем и мелкие включения -в

	горизонта	меньшей степени.
14,3	Порода, Днепровская морена, обводнена	Очень пластичный, тяжелый, более влажный, чем основная масса образцов. Наблюдаются карбонатные орштейны (новообразования при равномерном длительном обводнении карбонатной породы)

Изменение температуры и теплопроводности грунта в скважине дано на рис. 7.

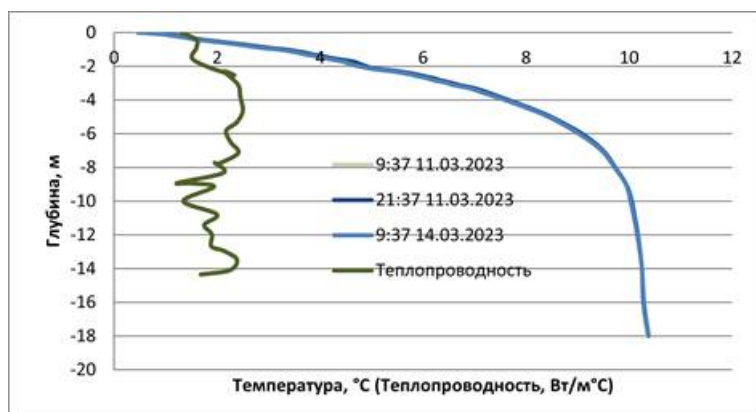


Рис. 7. Изменение температуры и теплопроводности грунта в скважине

Величина наблюдаемого термического градиента в скважине составляет 3°C/100м.

Результаты и заключение

Изучение стратиграфии снежной толщи на метеоплощадке МГУ зимой 2022-2023 года проводилось 22 декабря, 12 и 17 января, 1 и 21 февраля и 2 и 14 марта. 17 января была также пройдена траншея. Описание шурфов приведены в таблицах 2-8:

Таблица 2. Строение снежной толщи на площадке метеообсерватории МГУ 22 декабря 2022 г.

Слой, см	Строение и свойства снежной толщи
34-31	Слой состоит из формирующейся ледяной корки (инъекционной) с размером кристаллов (зёрен) до 3 мм (видимо на поверхности был иней). Поэтому поверхность больше похожа на глубинную изморозь.
31-20	Слой мокрого, рыхлого снега, образовавшийся в результате недавних снегопадов. Проникает кулак. (147, 143, 129 ср. плотность 140 кг/м3)
20-15	Слой более плотного, но менее твёрдого снега, чем в вышележащем слое. Бывший метелевый снег. Проникает 4 пальца. (212, 205, 186 ср. плотность 201 кг/м3)
15-14	Ветровая корка толщиной 1 см. В будущем станет ледяной, если её не размочит.
14-9	Слой мокрого, менее плотного снега, чем в вышележащем слое. Проникают 4 пальца. Размер кристаллов (зёрен) 1-2 мм. (245, 228, 222 ср. плотность 232 кг/м3)
9-7	Слой относительно рыхлого, полтаившего снега с

	Слой свежевыпавшего снега, подтаявшего снега с ограниченными кристаллами глубинной изморози. (Разрыхлённая корка) Размер кристаллов 2 мм.
7-0	Слой бывшей глубинной изморози с размером кристаллов до 3 мм и с ледяными включениями (304, 288, 290, 374 ср. плотность 314 кг/м ³)

Таблица 3. Строение снежной толщи на площадке метеообсерватории МГУ 12 января 2023 г.

Слой, см	Строение и свойства снежной толщи
31-28	Слой рыхлого осевшего снега, состоит из разрушенных снежинок с размером до 2 мм (115, 116, 101, 108 ср. плотность 110 кг/м ³)
28-27	Ледяная корка
27-26	Слой рыхлого снега с размером зёрен 1 мм
26-25	Ледяная корка
25-20	Льдистый горизонт, сложенный из мелкозернистых кристаллов с ледяными агрегатами (231, 294, 270 ср. плотность 265 кг/м ³)
20-15	Мелкозернистый снег с ледяными образованиями (347, 290, 314 ср. плотность 317 кг/м ³)
15-12	Ледяная корка
12-10	Среднезернистый снег. Проникает 4 пальца. (342, 356, 340 ср. плотность 3460 кг/м ³)
10-5	Сильно льдистый горизонт, глубинная изморозь. В нижней части разрыхлённый (324, 365, 350 ср. плотность 346 кг/м ³)
5-0	Притёртая ледяная корка. Размер кристаллов (зёрен) до 3 мм. (395, 363, 387 ср. плотность 382 кг/м ³)

Таблица 4. Строение снежной толщи на площадке метеообсерватории МГУ 17 января 2023 г.

Слой, см	Строение и свойства снежной толщи
30-28	Слой свежеснежавшего влажного снега
28-24	Слой среднезернистого (до 2 мм) не осевшего переработанного снега (проникают 4 пальца) (135, 122, 127 ср. плотность 128 кг/м ³)
24-22	Ледяная корка
22-17	Разрыхлённый слой среднезернистого снега (до 2 мм) с ледяными включениями (292, 256, 319 ср. плотность 289 кг/м ³)
17-15	Слабо льдистый горизонт, сложенный из среднезернистых кристаллов (до 2 мм)
15-10	Ледяная корка с размером зёрен 2-3 мм.
10-8	Разрыхлённый горизонт среднезернистого снега (до 2 мм) проходит палец
8-0	Сильно леденистый слой с размером зёрен до 3 мм и с наличием ледяных агрегатов. Палец не проходит.

Таблица 5. Строение снежной толщи на площадке метеообсерватории МГУ 1 февраля

2023 г.

Слой, см	Строение и свойства снежной толщи
28-26	Слой свежеснежного влажного снега
26-9	Слой смёрзшегося снега с размером зёрен 2-3 мм, с начальной стадией огранки с ледяными слоями. Верх слоя (329, 281, 303 ср. плотность 304 кг/м ³) Низ слоя (440, 435, 445 ср. плотность 440 кг/м ³) Корки на горизонтах 26, 23, 17, 15, 13
9-0	Леденитый слой (370, 340, 340 ср. плотность 350 кг/м ³)

Таблица 6. Строение снежной толщи на площадке метеообсерватории МГУ 21 февраля 2023 г.

Слой, см	Строение и свойства снежной толщи
41-46	Слой свежеснежного влажного снега На поверхности видны звездочки (51, 42, 44 ср. плотность 46 кг/м ³)
34-41	Слой осевшего снега. Проникает кулак (142, 171, 163 ср. плотность 159 кг/м ³)
26-34	Слой мелкозернистого снега с размером зёрен до 1 мм (230, 208, 189. плотность 209 кг/м ³)
13-26	Твёрдый леденитый слой огранённых крупнозернистых кристаллов (до 3 мм) глубинной изморози (проникает палец) (333, 320, 300. ср. плотность 318 кг/м ³)
9-26	Твёрдый леденитый слой среднезернистых кристаллов (до 2 мм) глубинной изморози (карандаш проходит, а палец-нет) (386, 420, 342. ср. плотность 383 кг/м ³)
0-9	Сильно леденитый слой агрегатов средне-крупнозернистых (до 2-3 мм) глубинной изморози

Таблица 7. Строение снежной толщи на площадке метеообсерватории МГУ 2 марта 2023 г.

Слой, см	Строение и свойства снежной толщи
35-36	Слой свежеснежного влажного снега. На поверхности видны дендритные кристаллы (снежинки-звездочки)
31-35	Слой осевшего снега. Смёрзшиеся оплавленные кристаллы и агрегаты. Размер зёрен 1-2 мм
19-31	Слой преобразованного снега (собирает перекристаллизация, округление). Размер зёрен 1-2 мм. На уровне 27 см есть ещё корка. (242, 231, 250. ср. плотность 241 кг/м ³)
12-19	Твёрдый леденитый горизонт (проникает карандаш) (282, 280, 225 ср. плотность 262 кг/м ³)
9-12	Твёрдый леденитый слой (проникает только нож)
	Разрыхление из огранённых кристаллов глубинной

	Строение по стратиграфическим кристаллам и изморози
0-9	Сплошная ледяная корка

Таблица 8. Строение снежной толщи на площадке метеообсерватории МГУ 14 марта 2023 г.

Слой, см	Строение и свойства снежной толщи
45-49	Слой влажного осевшего снега. Видны оплавленные кристаллы (режеляционное округление). Размер кристаллов (зёрен) до 2 мм. Входит 4 пальца. (145, 150, 150. ср. плотность 148 кг/м3)
43-45	Ледяная корка, образовавшаяся в результате ветра и таяния. Размер зёрен до 2 мм.
39-43	Слой влажного осевшего снега с отсутствием округления. Размер зёрен 1 мм. Проникают 4 пальца. (240, 280, 239. ср. плотность 253 кг/м3)
34-39	Леденистый слой СЗ-КЗ кристаллов размером 2-3 мм в начальной стадии огранки с ледяными включениями (проникает карандаш) (343, 321, 322 ср. плотность 328 кг/м3)
24-34	Влажный среднезернистый снег с размером кристаллов 2 мм. (265, 280, 283 ср. плотность 276 кг/м3)
14-24	Слой снежных кристаллов с огранкой с размером 2-3мм и с обилием ледяных включений (проникает палец) (337, 328, 301 ср. плотность 322 кг/м3)
9-14	Слой снежных кристаллов с размером 2-3мм и с обилием ледяных включений (проникает карандаш) (358, 363, 386 ср. плотность 372 кг/м3)
0-9	Сильно леденистый слой огранённых кристаллов размером 2 мм (проникает карандаш) (371, 391, 384 ср. плотность 382 кг/м3)

Стратиграфические колонки на 22 декабря 2022 и 21 февраля 2023 г. изображены на рис. 8.

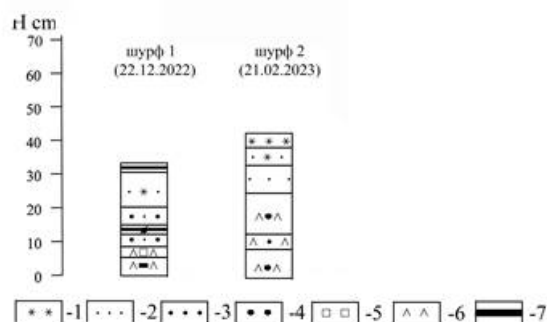


Рис. 8. Наблюдаемые разрезы снежного покрова на метеоплощадке 22 декабря 2022 и 21 февраля 2023 г. Условные обозначения: 1 – свежеснеживший снег, 2 – мелкозернистый снег (0,1-0,5 мм), 3 – среднезернистый снег (0,5-1 мм), 4 – крупнозернистый снег (1-3,5 мм); 5 – огранённые кристаллы; 6 – кристаллы глубинной изморози 7 – ледяная корка (по международной классификации [5]).

Полученные данные позволили охарактеризовать и оценить изменения снежных слоев, их структуру и плотность в пространственно-временном отношении. Результаты работы отображены на графиках пространственно-временной изменчивости снежного покрова за 2022/2023 гг., проанализирована эволюция снежной толщи за зимний период. Анализ наблюдений отражает действительно высокую пространственную и временную изменчивость снежного покрова зимой, что позволяет не только оценить и сравнить полученные данные с прошлыми исследованиями,^[6] но и дополнить и усовершенствовать уже имеющуюся информацию о неоднородности снежного покрова.

Библиография

1. Голубев В.Н., Петрушина М.Н., Фролов Д.М. Закономерности формирования стратиграфии снежного покрова // Лед и снег. — 2010. — № 1. — С. 58–72.
2. Голубев В. Н., Фролов Д. М. Особенности миграции водяного пара на границах раздела атмосфера–снежный покров и снежный покров–подстилающий грунт // Криосфера Земли. — 2015. — Т. 19, № 1. — С. 22–29
3. Комаров А. Ю. и др. Пространственно-временная неоднородность снежной толщи по данным пенетрометра SnowMicroPen // Лёд и Снег. – 2018. – Т. 58. – №. 4. С. 473–485.
4. Отчёт об изменении климата в РФ за 2022 год.
5. Фирц Ш. и др. Международная классификация для сезонно выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова). – 2012.
6. Фролов Д. М. и др. Изучение пространственно-временной неоднородности снежной толщи на площадке МО МГУ зимой 2018/2019 гг. // Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2018 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени МВ Ломоносова. – 2019. – С. 225–230.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, метеорологические и криологические исследования на метеоплощадке МГУ зимой 2022/23 года.

Методология исследования, в статье не указаны, но исходя из анализа статьи можно сделать вывод о использовании методов анализа и фиксации наблюдения за динамикой метеорологических наблюдений, а также анализ литературных данных. Судя по иллюстративным материалам автором предпринятой экспедиционные полевые методы исследования, с последующих камеральной обработкой.

Актуальность затронутой темы безусловна и состоит в получении информации о выявлении действительно высокой пространственной и временной изменчивости снежного покрова зимой, что позволяет не только оценить и сравнить полученные данные с прошлыми исследованиями, но и дополнить и усовершенствовать уже имеющуюся информацию о неоднородности снежного покрова, что важно для теории криолитогенеза и метеорологии.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований охарактеризовать и оценить изменения снежных слоев, их структуру и плотность в пространственно-временном отношении. Это является важным дополнением в развитии геофизиологии и истории наблюдений за метеороэлементами.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья

снабжена богатым иллюстративным материалом. Предложенный подход к теории развития покровных ледников может оказаться полезным при формировании альтернативных взглядов на некоторые вопросы гляциологии, что делает представленные автором статьи результаты весьма интересными.

Однако есть ряд вопросов, в частности:

Автору статьи следовало бы выделить разделы статьи для лучшего восприятия кроме целевой установки указать методы исследования и задачи.

На климатодиограммах средних температур воздуха неплохо было бы представить отклонение от средней среднего значения, что проиллюстрировало бы многолетнюю динамику изменения этого показателя.

Автор статьи следовало поработать над оформлением - Таблица 1. Скважина 2021 г. на Метеорологической обсерватории МГУ, Таблица 2. Строение снежной толщи на площадке метеообсерватории МГУ 22 декабря 2022 г. и Таблица 3. Строение снежной толщи на площадке метеообсерватории МГУ 12 января 2023 г. представить в виде диаграммы, что сделало бы график более наглядным и аргументированным.

Интересно было бы услышать авторскую аргументацию причин высокой неопределенности пространственные и временного распространения снежного покрова на данной территории.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на результаты ретроспективного анализа состояния метеозлементов данной территории и методические рекомендации по анализу особенности.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволившие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Сулейманов А.А. — Из истории геокриологического изучения прибрежно-шельфовой зоны морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в 1950–1980-е гг // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 1. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.1.39874 EDN: PIKAKG URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=39874

Из истории геокриологического изучения прибрежно-шельфовой зоны морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в 1950–1980-е гг

Сулейманов Александр Альбертович

кандидат исторических наук

старший научный сотрудник, Институт гуманитарных исследований и проблем малочисленных народов Севера Сибирского отделения РАН

677027, Россия, республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Петровского, 1, каб. 403

✉ alexas1306@gmail.com



[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2023.1.39874

EDN:

PIKAKG

Дата направления статьи в редакцию:

01-03-2023

Аннотация: Представлен исторический анализ исследований, проведенных в течение 1950-х –1980-х гг. сотрудниками первоначально Якутской научной-исследовательской мерзлотной станции Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева Академии наук СССР, а с 1962 г. – организованного на ее основе Института мерзлотоведения Сибирского отделения Академии наук СССР и направленных на изучение прибрежно-шельфовой зоны моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. Источниками при подготовке статьи послужили выявленные автором архивные материалы из фондов Российского государственного архива экономики и Архива Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, а также данные научной литературы. Впервые осуществлена реконструкция истории наиболее репрезентативных геокриологических исследований, проведенных в прибрежно-шельфовой зоне моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря в период, начиная с первых изысканий подобной направленности и заканчивая концом советской эпохи, последовавшие после которой трансформации привели к существенным изменениям, в том числе, и области научных изысканий в Российской Арктике. Проведенная работа позволила показать значительную активность исследователей по изучению поддонной мерзлоты. Ее драйверами выступали как чисто познавательный

интерес, так и потребности индустриального освоения высоких широт. В ходе осуществленных изысканий были получены данные, характеризующие распространенность и мощность поддонной мерзлоты, ее температурный режим, состав и другие свойства.

Ключевые слова:

Арктика, Якутия, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, шельф арктических морей, история науки, научные исследования, Академия наук СССР, геокриология, поддонная мерзлота

Введение

К арктической зоне Республики Саха (Якутия) (далее – Якутия) относится 13 административных районов (улусов), общая площадь территории которых превышает 1600 тыс. кв. км. Практически полностью эта огромная территория расположена севернее Северного полярного круга и находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород («вечной мерзлоты»), оказывающих определяющее влияние на особенности ведения хозяйственной деятельности в регионе, включая разведку и добычу полезных ископаемых. При этом в недрах арктических районов Якутии хранятся богатейшие запасы золота, алмазов, олова, редкоземельных металлов, имеются значительные перспективы в плане нефтегазоносности [\[11\]](#).

С севера Заполярную Якутию омывают воды морей Северного Ледовитого океана – моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. Важность понимания наличия и границ распространенности здесь многолетнемерзлых пород, их мощности и температурного режима возрастала по мере усиления интереса к экономического потенциалу шельфа арктических морей в нашей стране. Осмысление и исторический анализ накопленного в этом отношении опыта, в особенности, в свете текущих планов по реиндустриализации Российской Арктики в качестве одного из ответов на санкционное давление представляется важной задачей сегодняшнего дня.

Актуализирует рассматриваемую проблематику также и состояние ее научной проработанности. В настоящее время историография темы представлена лишь рядом работ, которые посвящены вопросам становления геокриологической науки и ее развития в Якутии [\[1; 2; 14\]](#), несколькими исследованиями биографического плана, где упоминается организация и участие отдельных ученых в изысканиях, проводившихся, в том числе, в прибрежно-шельфовой зоне [\[12; 16; 17\]](#), а также докторской диссертацией М.Н. Григорьева «Криоморфогенез и литодинамика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири» [\[13\]](#), в которой представлен краткий исторический обзор изысканий, осуществленных по данной теме. Авторы всех этих трудов ставили перед собой, таким образом, совершенно иные задачи.

В связи с этим целью данной статьи является реконструкция истории наиболее репрезентативных геокриологических исследований, проведенных в прибрежно-шельфовой зоне моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря в период, начиная с первых изысканий подобной направленности и заканчивая концом советской эпохи, последовавшие после которой трансформации привели к существенным изменениям, в том числе, и в области научных изысканий в Российской Арктике. При этом, учитывая ограниченные рамки статьи, в фокусе внимания автора будут находиться только

исследования, в которых участвовали сотрудники ведущего актора геокриологического изучения арктических районов Якутии в рассматриваемый период: первоначально Якутской научной-исследовательской мерзлотной станции Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева Академии наук СССР (ЯНИМС ИНМЕРО), а с 1962 г. – организованного на ее основе Института мерзлотоведения Сибирского отделения Академии наук (ИМЗ СО АН) СССР (г. Якутск).

Материалы и методы

Работа основана, главным образом, на анализе экспедиционных и научных отчетов, которые были выявлены автором в ходе поисковой работы в Российском государственном архиве экономики (г. Москва) и Архиве Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (ИМЗ СО РАН, г. Якутск), а также аккумулированной научной литературы, в большей или меньшей степени имеющей отношение к рассматриваемой проблематике.

Результаты и обсуждение

Вероятно, первыми геокриологическими исследованиями в Якутии, в рамках которых, в том числе, исследовались многолетнемерзлые породы в прибрежно-шельфовой зоне, стали работы участников Северного отряда ЯНИМС ИНМЕРО к.г.н. Н.Ф. Григорьева (нач. и бурового мастера К.А. Строева в 1951 г. Изыскания проводились в устьевых участках Яны и Индигирки по просьбе Якутского аэрогеодезического предприятия для повышения эффективности процесса наземных работ по аэрофотосъемке в арктических районах Якутии, который имел значительную специфику в силу неглубокого залегания здесь многолетнемерзлых пород.

Исследования получилось совместить с работами в прибрежно-шельфовой зоне. В период с 18 до 28 августа Н.Ф. Григорьев, К.А. Строев и двое нанятых рабочих приступили к изысканиям на расположенном в устье Правой протоки р. Яны острове Ниряй-Ары на побережье моря Лаптевых. На этом острове были проведены маршрутные исследования с целью изучения его геоморфологии и геологии, а также пробурена скважина глубиной в 13 м для измерения температуры многолетнемерзлых пород. Помимо этого, геокриологи пробурили две скважины на дне моря Лаптевых на расстоянии в 10 км от берега. При глубине моря в 1,5 – 1,7 м скважины были углублены в дно на 2 – 3,5 м [\[19, л. 1-7\]](#).

Полученные при бурении скважин сведения, позволили установить глубину залегания верхней границы «вечной мерзлоты» и ее примерную мощность на морском дне в месте проведения изысканий. Помимо чисто познавательного значения, данные материалы имели определенную ценность в поиске решений проблемы углубления фарватера в районе бара устья Яны [\[20, л. 1-20\]](#).



Рис. 1. Бурение скважины участниками Северного отряда ЯНИМС ИНМЕРО 1951 г. Фото Н.Ф. Григорьева [\[3, л. 14\]](#).

Исследования поддонной мерзлоты получили продолжение в апреле 1953 г., когда во время работы Экспедиции № 1 ИНМЕРО в Заполярной Якутии ее участники вновь под руководством Н.Ф. Григорьева со льда пролива Дмитрия Лаптева заложили вдоль материкового побережья 15 зондировочных скважин глубиной от 1 до 6 м [\[21, л. 11-12\]](#).

Более направленными изыскания подобного рода стали в 60-е гг. XX в. В течение 1962–1963 гг. в арктических районах Якутии проводилась Северная экспедиция ИМЗ СО АН СССР (нач. Н.Ф. Григорьев). Одной из самостоятельных задач экспедиции являлось «определение условий теплообмена и термического режима многолетнемерзлых пород в шельфовой зоне и прибрежных частях арктических морей» [\[4, л. 9\]](#).

В задачу Приморского отряда, возглавил работу которого сам Н.Ф. Григорьев, входило проведение исследований на побережье Восточного-Сибирского моря в районе бара (песчаная подводная отмель в устье) р. Индигирки, острове Песчаный в море Лаптевых, в районе бухты Тикси, а также в Карском море на острове Вилькицкого. Наряду с руководителем в состав отряда в 1962 г. входило еще 11 исследователей. Плавучей базой для геокриологов являлся лихтер «Полярный», который буксировался катером РБТ-48. Перемещения к непосредственному месту работ осуществлялись на шлюпке или катере [\[4, л. 11-16\]](#). 15 июля исследователи прибыли на «Полярном» из Чокурдаха в устье протоки Средней и приступили к продолжавшимся в течение месяца работам вдоль морского побережья дельты Индигирки в районе острова Немкова.

В дельте Индигирки на периодически затапливаемых морем песках Приморских была пробурена первая опорная скважина. Всего же в этом районе геокриологи заложили 8 скважин глубиной от 3 до 9,6 м. Из них 3 скважины находились в пределах песчаных отмелей. Остальные 5 были пробурены с помощью разборной буровой треноги в море. Бурение в данном случае производилось с площадки, высота которой регулировалась в зависимости от глубины моря. После окончания бурения в скважину опускались электротермометры, с помощью которых измерялась температура донных отложений через полутораметровые интервалы. Н.Ф. Григорьев, таким образом, использовал и совершенствовал опыт, полученный им в ходе названных ранее изысканий 1951 и 1953 гг.

В процессе мерзлотно-геологической съемки, наряду с бурением скважин, для определения строения, состава и температуры многолетнемерзлых пород был пройден ряд шурфов глубиной до 1,5 м. Кроме того, в ходе изысканий осуществлялись измерения температуры воды на разных горизонтах, а также с помощью щупа – глубины сезонного протаивания донных отложений, производились геоморфологические наблюдения [\[4, л. 17-42\]](#).

В следующем году участники Приморского отряда уже под руководством М.С. Иванова продолжили исследования в прибрежно-шельфовой зоне. В апреле – мае 1963 г. геокриологи осуществили изыскания в районе бара р. Яны. Здесь исследователи с морского льда пробурили 6 скважин глубиной до 10 м и заложили 3 зондировочных шурфа. В результате исследований была определена температура донных отложений на разных глубинах, в том числе, на морском склоне бара, а на отдельных участках на глубину 2 м ниже морского дна.

После этого участники Приморского отряда отправились в рыбацкий поселок Юедей, расположенный в северо-восточной части дельты Яны. Плавучей базой отряда являлся арендованный теплоход «Лиза Чайкина». В окрестностях Юедея исследователи пробурили 6 скважин, включая опорную, которая имела глубину 20 м. Во всех скважинах был проведен цикл температурных наблюдений, а извлеченные керны описаны и переданы для лабораторных исследований. Еще две скважины были пробурены с борта «Лизы Чайкиной» на дне Янского взморья с помощью треног.

По завершению работ часть участников Приморского отряда с буровым оборудованием и снаряжением была переброшена на самолетах АН-2 из Нижнеянска в с. Юкагир. Здесь на восточном берегу Сиэлляхского залива было пробурено еще 3 скважины. При этом одна из них была пройдена на дне моря на расстоянии 700 м от берега на глубину в 6 м. В процессе ее бурения отбирались и описывались керны мерзлых морских донных и прибрежных отложений. Во всех трех скважинах производились измерения температуры на разных глубинах [\[5, л. 7-13\]](#).

Проведенные в рамках Северной экспедиции ИМЗ СО АН СССР изыскания позволили получить комплекс сведений, которые относились к геотермическим особенностям прибрежной полосы и мелководных участков моря, криогенных текстур дельтовых и морских отложений. На основе этих сведений ученые выделили типы отложений и представили характеристику формирования каждого из них. На этой базе была реконструирована история развития многолетнемерзлых пород на берегах, отмелях и дне прибрежной части моря [\[4, л. 17-76\]](#).



Рис. 2. Бурение скважины участниками Северной экспедиции 1962-1963 гг. Восточно-Сибирское море в районе дельты р. Индигирки, 1962 г. Фото Н.Ф. Григорьева [\[4, л. 12\]](#)

Работы участников Северной экспедиции фактически положили начало комплексному изучению условий формирования и характера распространения многолетнемерзлых пород на дне континентального шельфа, мелководных заливов и приустьевых взморий Арктического бассейна. В результате проведенных изысканий была выработана первая классификация типов мерзлых толщ, установлено, что в подавляющей части акватории рассматриваемого шельфа на глубинах, превышающих мощность ледового покрова, многолетнемерзлые породы имеют реликтовое происхождение. Одновременно геокриологи доказали возможность формирования многолетнемерзлых отложений в современных условиях на мелководных участках акваторий морей, омывающих берега Якутии [\[22, с. 60-67\]](#).

Новый импульс исследовательским работам на арктическом шельфе в Советском Союзе придало создание в 1972 г. на базе НИИ геологии Арктики (г. Ленинград), а также Полярной (г. Ломоносов), Морской арктической (г. Мурманск) и Норильской экспедиций Северного морского научно-производственного геолого-геофизического объединения («Севморгео»). Причинами ее появления послужили, во-первых, успехи ряда западных стран в освоении нефтегазовых ресурсов шельфа северных морей, во-вторых, появление серьезных оснований для начала поиска аналогичных месторождений на арктическом шельфе Советского Союза. В частности, в 1969 г. в Министерство геологии СССР, была представлена первая в стране «Карта перспектив нефтегазоносности арктического побережья и шельфа СССР» масштаба 1:5000000 с оценкой прогнозных ресурсов в 60 млрд. т. В данном контексте неудивительно, что первоочередной задачей, поставленной перед «Севморгео», руководителем которого был назначен будущий академик АН СССР д.г.-м.н. И.С. Грамберг, стали работы, связанные с изучением нефтегазоносности арктического шельфа Советского Союза, которые включали комплекс геолого-геофизических изысканий [\[15\]](#). Участником одной из подобных экспедиций, осуществлявшихся в прибрежной зоне островов Большой Ляховский и Земля Бунге, а также в акватории пролива Санникова, являлся ст. лаборант ИМЗ СО АН СССР А.И. Фартышев.

Целью изысканий исследователя в 1974–1975 гг. было изучение истории формирования, состава и криогенного строения четвертичных отложений, параметров субаквальной

криолитозоны в проливе Санникова и выяснение особенностей развития повторно-жильных льдов в ареале.

Для ее достижения А.И. Фартышев изучил керн из более чем 70 пробуренных скважин глубиной до 140 м. В 10 из этих скважин были проведены температурные измерения, в 40 – исследованы состав, строение и льдистость пород. Кроме того, геокриолог изучил разрезы 16 естественных обнажений и 30 шурфов, определил влажность 60 образцов мерзлых пород, а также отобрал еще свыше 300 образцов на химический, спорово-пыльцевой и диатомовый анализы, определение их абсолютного возраста в лабораторных условиях [\[6, л. 4\]](#).

В результате обобщения полученных данных А.И. Фартышев выявил особенности строения кайнозойских отложений криогенного происхождения, установил температуру многолетнемерзлых пород на островах Большой Ляховский и Земля Бунге, а также мерзлотно-геологическую ситуацию в проливе Санникова. Кроме того, на основе геоморфологического, мерзлотно-фациального и химического анализов исследователь проследил генезис формирования аласовидных котловин, расположенных в прибрежной зоне. Анализ же извлеченных из дна пролива Санникова пород позволил А.И. Фартышеву сделать вывод о наличии нескольких исторических циклов глубокого промерзания и протаивания морских пород. При этом толща этих пород мощностью 50–60 м имеет отрицательную температуру и включает многолетнемерзлые грунты [\[6, л. 29–108\]](#).

С необходимостью научного обеспечения освоения природных ресурсов арктического шельфа Советского Союза Ф.Э. Арэ, Е.Н. Молочушкин, В.В. Войченко и З.Н. Антипина (ИМЗ СО АН СССР) увязывали подготовку «Прогнозной карты распространения криолитозоны под дном арктических морей и Полярного бассейна». Следует отметить, что работа над картой в значительной степени стала возможна благодаря массиву данных, аккумулированных в ходе рассмотренных выше исследований. Кроме того, использовались показатели температуры придонных слоев воды на шельфе, выявленные в ходе многолетних изысканий сотрудников Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (АНИИ) [\[7, л. 5–7\]](#).

Как отметили составители карты, проведение геологоразведочных работ на шельфе, строительство морских сооружений, разработка субаквальных месторождений полезных ископаемых требовали такого же учета комплекса криогенных факторов, «как и при освоении природных ресурсов суши». При этом на тот момент «геокриологическая изученность морского дна» находилась на «крайне низком уровне» [\[7, л. 4\]](#).

В этой связи показательно, что при составлении карты, исследователи опирались, прежде всего, на обобщение имевшихся данных о происхождении, температуре и солености придонных слоев Арктического бассейна и его окраинных морей. На основе этой работы З.Н. Антипиной на ЭВМ М-222 были осуществлены расчеты и математическое моделирование деградации многолетнемерзлых пород под дном морей [\[7, л. 9–45\]](#).

Проведенные изыскания позволили Ф.Э. Арэ, Е.Н. Молочушкину, В.В. Войченко и З.Н. Антипиной в 1976 г. составить прогнозную карту распространения субаквальной криолитозоны в азиатском секторе Арктики – под дном Карского и Чукотского морей, моря Лаптевых и Восточного-Сибирского моря в масштабе 1:10000000 [\[7, л. 51\]](#).

Вскоре получило развитие и дальнейшее изучение «вечной мерзлоты» на шельфовых участках арктических морей. В полевой сезон 1978 г. сотрудники ИМЗ СО АН СССР А.В. Ефимов, А.И. Фартышев, В.Ю. Шамшурин, Ю.Ф. Урицкий, В.В. Полубелов, И.И. Баранов

А.Е. Кузьмин занимались исследованиями в акватории Восточно-Сибирского моря у острова Большой Ляховский. Изыскания проводились в соответствии с трехсторонним договором, заключенным ИМЗ СО АН СССР, «Севморгео» и ААНИИ. Следует отметить, что интерес «Севморгео» к работам в ареале был обусловлен осуществлением им поискового бурения в пределах шельфовой зоны на олово [\[8, л. 6-8\]](#).

В период с 20 мая по 26 июля исследованиями была охвачена акватория Восточно-Сибирского моря, прилегающая к северной оконечности острова Большой Ляховский. Работы здесь включали проходку силами специалистов «Севморгео» 8 скважин глубиной до 62 м. 7 из этих скважин были пробурены со льда Восточно-Сибирского моря на расстоянии от 1,1 км до 160 м от берега. Еще одна – на берегу в непосредственной близости от моря. В ходе изысканий геокриологи осуществили в этих скважинах 23 измерения температуры грунта на различных глубинах, произвели наблюдение за восстановлением естественного температурного режима горных пород, а также отобрали их образцы для последующего лабораторного анализа. В результате исследований ученые определили состав, влажность, соленость, удельный вес, теплофизические свойства пород, слагающих шельфовую криолитозону, составили ее типологизацию и установили мощность – 50–70 м и более [\[8, л. 9-116\]](#).

В начале 80-х гг. XX в. геокриологические исследования в Заполярной Якутии получили существенный импульс в рамках реализации фундаментальной программы «Сибирь» [\[18\]](#). В течение 1981–1985 гг. в дельте Лены проводилась Северная (Арктическая) экспедиция ИМЗ СО АН СССР. Научное руководство экспедицией осуществляли первоначально д.г.н. Ф.Э. Арэ, затем академик АН СССР П.И. Мельников. Начальниками экспедиции являлись к.г.-м.н. М.И. Тишин (1981 г.), В.В. Куницкий (1982–1983 гг.), С.Ю. Королев (1984 г.) и М.Н. Григорьев (1985 г.) – сын Н.Ф. Григорьева.

Исследования участников Арктической экспедиции ИМЗ СО АН СССР своей основной направленностью имели изучение генезиса мерзлых четвертичных отложений в прибрежной зоне моря Лаптевых, выяснение закономерностей их развития и условий накопления. Общая площадь района исследований составила порядка 36 кв. км и охватила территорию от хребта Чекановского на западе до Хараулахских гор на востоке и береговой зоны моря Лаптевых между Буор-Хая и Оленекским заливом на севере. Экспедиционные работы проводились в весеннее и летнее время. Всего в течение 5 лет участники экспедиции преодолели около 550 км сухопутных и водных маршрутов (экспедиционное судно «Криосфера», катер «Прогресс-2М» и более мелкие плавсредства), в ходе которых изучались разрезы мерзлых четвертичных отложений в обнажениях на полуострове Быковский, островах Муостах, Арга-Муора-Сисе и других в Оленекской, Малой Туматской, Трофимовской и Быковской протоках р. Лены. Кроме того, производились аэровизуальные наблюдения и бурение более 60 скважин. Базировались участники экспедиции на опорном пункте Раздельный в районе Быковского полуострова [\[9, л. 7-12; 10, л. 5-11\]](#).

38 из скважин в весенний период были пробурены с поверхности ледового покрова моря Лаптевых. Некоторые из них имели глубину более 50 м и располагались на удалении 1–3 км от берега. Полученные в ходе бурения образцы керна документировались. Кроме того, проводилось послойное определение влажности и отбор мерзлых пород для их последующего лабораторного изучения. В камеральный период в лабораторных условиях производился гранулометрический анализ полученного материала, анализ химического состава проб грунта и морских вытяжек, подземных льдов, а также осуществлялась радиоуглеродная датировка абсолютного возраста пород. Несколько

доставленных в лабораторию в ненарушенном мерзлом состоянии образцов керна удалось изучить на предмет определения теплопроводности и теплоемкости.

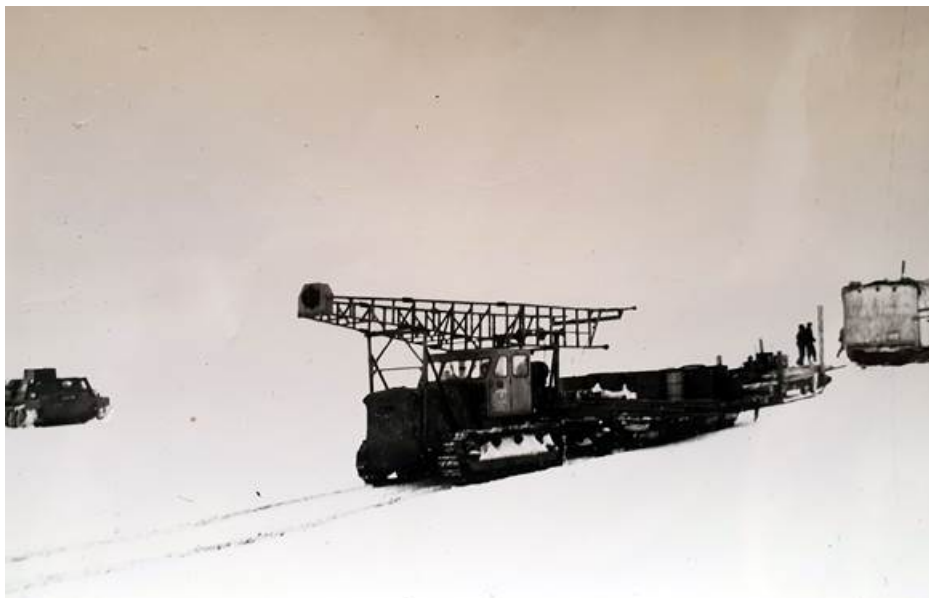


Рис. 3. Буровой санно-тракторный поезд участников Северной (Арктической) экспедиции ИМЗ СО АН СССР [9, л. 478]

Осуществленные в прибрежной полосе моря Лаптевых изыскания позволили впервые доказать широкое распространение поддонных мерзлых пород на расстоянии до 3 км от береговой линии. Важным результатом стало составление схематической криолитологической карты исследованного района в масштабе 1:1000000, которую сотрудники Института геологии Якутского филиала СО АН СССР О.В. Гриненко и А.И. Сергеенко называли «фактической схемой прогноза возможностей использования территории для различных народно-хозяйственных целей» [10, л. 260-261].

Вместе с тем, следует отметить, что от первоначальных планов по детальному исследованию процессов формирования и развития многолетнемерзлых пород в прибрежно-шельфовой зоне участники изысканий были вынуждены отказаться в силу с недостаточной технической оснащенностью экспедиции [10, л. 8] – даже в период, который часто называют «золотым» в истории отечественной науки, у исследователей далеко не всегда была ресурсная возможность осуществить все задуманное.

Несмотря на это Арктическая экспедиция ИМЗ СО АН СССР стала одной из крупнейших в советской истории геокриологического познания прибрежно-шельфовой зоны морей, омывающих Якутию, ее участники выполнили весьма значительный по масштабам комплекс работ, направленных на исследование мерзлых толщ, используя широкий спектр методов изучения криолитозоны, навыки применения которых были аккумулированы к тому времени в стенах Института мерзлотоведения СО АН СССР.

Заключение

Представленный материал свидетельствует о том, что геокриологические изыскания в прибрежно-шельфовой зоне моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря в рассмотренный период развивались достаточно активно. Интенсивность исследовательских работ в этом направлении определял как чисто познавательный интерес, стремление к получению новых сведений в рамках относительно молодой тогда науки – геокриологии, так и сугубо практический. В 1950-е гг., видимо, более важным

было стремление оптимизировать процесс работ по транспортному освоению арктической зоны Якутии с учетом необходимости захода судов различного класса в устьевые участки северных рек. С получением сведений о перспективах добычи на шельфе полезных ископаемых, осмыслением накопленного в этом отношении мирового опыта важнейшим драйвером исследовательских работ стал природно-ресурсный потенциал прибрежно-шельфовой зоны, что наиболее отчетливо проявилось с начала 70-х гг. XX в. Следует отметить также ритмичное совершенствование методики исследований геокриологов, их технической оснащенности и внедрение новых подходов к анализу полученных данных, включая использование ЭВМ. В том числе это позволило геокриологам в ходе рассмотренных изысканий получить данные не только об интересовавших их изначально вопросах распространенности и мощности поддонной мерзлоты, но также о ее температурном режиме, составе и различных свойствах.

Библиография

1. Академическое мерзлотоведение в Якутии / Отв. ред. Р.М. Каменский. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 1997. – 328 с.
2. Академическая наука в Якутии (1949–2009 гг.) / Гл. ред. А.Ф. Сафронов, отв. ред. В.В. Шепелев. – Новосибирск: Гео, 2009. – 220 с.
3. Архив Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения (ИМЗ СО) РАН. Д. 553. 20 л.
4. Архив ИМЗ СО РАН. Д. 720. 540 л.
5. Архив ИМЗ СО РАН. Д. 829. 371 л.
6. Архив ИМЗ СО РАН. Д. 1368. 108 л.
7. Архив ИМЗ СО РАН. Д. 1402. 54 л.
8. Архив ИМЗ СО РАН. Д. 1482. 151 л.
9. Архив ИМЗ СО РАН. Д. 1623. 420 л.
10. Архив ИМЗ СО РАН. Д. 1657. 261 л.
11. Волков А.В. Горнодобывающая промышленность арктической Якутии // Портал о развитии Арктики. Режим доступа: <https://goarctic.ru/politics/gomodobyvayushchaya-promyshlennost-arkticheskoy-yakutii/> (дата обращения: 10.02.2023)
12. Григорьев М.Н. Григорьев Николай Филиппович. Серия «Ученые-мерзлотоведы». – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2000. – 63 с.
13. Григорьев М.Н. Криоморфогенез и литодинамика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири: дис. ... д-ра геогр. наук. – Якутск: ИМЗ, 2008. – 291 с.
14. Институт мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР: 1939–1963 / Отв. ред. В.П. Мельников, В.В. Баулин. – Новосибирск: Гео, 2007. – 193 с.
15. Каминский В.Д., Иванов В.Л. Роль НИИГА-ВНИИОкеангеология в полярной и морской геологической науке // 70 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане. Сборник научных трудов. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2018. – С. 3–18.
16. Климовский И.В. Академик Павел Иванович Мельников. – Новосибирск: Гео, 2008. – 305 с.
17. Климовский И.В., Мандаров А.А. Арэ Феликс Эрнестович (к 75-летию со дня рождения // Криосфера Земли. – 2002. – № 3. – С. 100–101.
18. Куперштох Н.А. Разработка и реализация социально-экономических проектов комплексной программы «Сибирь» в 1980-1990-е гг. // Историко-экономические исследования. – 2018. – №4. – С. 514-528. DOI 10.17150/2308-2588.2018.19(4).514-528.

19. Российский государственный архив экономики (РГАЭ). Ф. 82. Оп. 2. Д. 605. 21 л.
20. РГАЭ. Ф. 82. Оп. 2. Д. 633. 20 л.
21. РГАЭ. Ф. 82. Оп. 2. Д. 716. 27 л.
22. Сулейманов А.А. Исследования Северной экспедиции Института мерзлотоведения СО АН СССР 1962–1963 гг. в арктических районах Якутии // Северо-Восточный гуманитарный вестник. – 2021. – № 3. – С. 57–67. – DOI 10.25693/SVGV.2021.36.3.006.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

ОТЗЫВ

На статью «Из истории геокриологического изучения прибрежно-шельфовой зоны морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в 1950–1980-е гг.»

Предмет исследования- история геокриологического изучения прибрежно-шельфовой зоны морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в 1950-1980-е гг.

Хронологические рамки исследования ограничены 1950-1980-ми годами, т.е. советским периодом, когда серьезное внимание уделялось изучению арктической зоны страны, в том числе региона морей Лаптевых и т.д. как с научной, так и с экономической точки зрения.

Методология исследования базируется на общенаучных методах и специально-исторических (сравнительно-исторический и системно-сопоставительном и др.).

Актуальность исследования обусловлена экономической ролью региона «в свете текущих планов по реиндустриализации Российской Арктики в качестве одного из ответов на санкционное давление зарубежных стран». Кроме того, имеется запрос и на научное изучение этой важной в экономическом плане зоны. В этой связи представляет большой интерес историографическое изучение темы. С историографической точки зрения есть только несколько работ, которые посвящены вопросам «становления геокриологической науки и ее развития в Якутии» и несколько «исследований биографического плана», в которых затрагиваются вопросы организации и участие отдельных ученых, проводивших исследования в прибрежно-шельфовой зоне и еще несколько работ, в который в той или иной мере дается краткий обзор исторических изысканий.

Научная новизна рецензируемой работы состоит в том, что она ставит целью «реконструкцию истории наиболее репрезентативных геокриологических исследований, проведенных в прибрежно-шельфовой зоне моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря в период, начиная с первых изысканий подобной направленности и заканчивая концом советской эпохи». По сути это первая работа, в которой будет проведен анализ исследований, сотрудников Якутской научной-исследовательской мерзлотной станции Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева Академии наук СССР (ЯНИМС ИНМЕРО), с 1962 г. – организованного на ее основе Института мерзлотоведения Сибирского отделения Академии наук (ИМЗ СО АН) СССР (г. Якутск). Эта организация по сути является ведущей в области геокриологического изучения арктических районов Якутии в рассматриваемый авторами рецензируемой статьи хронологический.

Стиль статьи академический, ясный. По мнению рецензента, в статье грамотно

использован источники, грамотно использовал методы научного познания, соблюдал принципы логичности, систематичности и последовательности изложения материала. Структура работы логично выстроена из состоит из следующих блоков: введение, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение. Структура работы направлена на достижение цели работы и поставленных задач.

Библиография рецензируемой статьи состоит из 22 источников (это статьи и др. работы по теме, архивные материалы) и в целом свидетельствует о знании предмета исследования и также указывает, что автор поднял серьезную и до настоящего времени слабо исследованную тему.

Апелляция к оппонентам заявлена на примере анализа литературы по теме, упомянутых в статье. Кроме того, проделанная автором работа и выводы дает ответ оппонентам.

Выводы, интерес читательской аудитории. Выводы автора вытекают из проделанной автором серьезной работы над всеми имеющимися источниками (материалами из Российского государственного архив экономики и Архива Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения РАН), некоторые из этих материалов впервые вводятся в научный оборот и работ предшественников. Работа будет интересна как специалистам, так и широкому кругу читателей, учитывая ее актуальность.

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Хименков А.Н., Кошурников А.В., Дернова Е.О. — Газонасыщенные мёрзлые породы, как объект изучения геокриологии // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 1. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.1.40378 EDN: PLNGUD URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=40378

Газонасыщенные мёрзлые породы, как объект изучения геокриологии

Хименков Александр Николаевич

кандидат геолого-минералогических наук

ведущий научный сотрудник, Институт геоэкологии РАН

101000, Россия, г. Москва, Уланский проезд, 13, стр. 2

✉ a_khimenkov@mail.ru



Кошурников Андрей Викторович

кандидат геолого-минералогических наук

Ведущий научный сотрудник, МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Кафедра геокриологии,

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1

✉ msu-geophysics@mail.ru



Дернова Елена Олеговна

Научный сотрудник, Институт геоэкологии РАН

101000, Россия, г. Москва, ул. Уланский Переулок, 13 строение 2

✉ dernova.eo@gmail.com



[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2023.1.40378

EDN:

PLNGUD

Дата направления статьи в редакцию:

05-04-2023

Аннотация: Предметом исследования предлагаемой статьи являются газовая составляющая криолитозоны. Если твёрдая и жидкая фазы мёрзлых пород изучены достаточно глубоко и системно, то газовая компонента исследована слабо и фрагментарно. Объектом исследования являются газонасыщенные мёрзлые грунты, их

пространственное распределение и свойства. Исследования последних десятилетий показали, что газовая составляющая играет значительную роль в строении и свойствах мерзлых пород. Автор подробно рассматривает такие аспекты темы, как влияние газа на физико-механические свойства как талых, так и мерзлых грунтов. Особое внимание перекрытию газом капилляров в грунте, увеличению порового давления, ослаблению консолидации грунта и связей между грунтовыми частицами. Это, в свою очередь, выражается в снижении прочности и плотности при одновременном увеличении сжимаемости и пористости. Новизна исследования заключается в том, что впервые был проведён сравнительный анализ данных по содержанию газовой составляющей давлению в ней и процессами, происходящими в мёрзлых породах. Особым вкладом автора в исследование темы является то, что показано влияние свободного газа на их физико-механические свойства. Актуальность рассматриваемой темы обусловлена необходимостью изучения закономерностей деформирования мёрзлых пород в зависимости от степени газонасыщения. В статье проанализировано состояние нормативной базы, учитывающей влияние газов на прочностные и деформативные свойства. Зафиксировано их практически полное отсутствие. Показана важность учёта возможного повышенного давления в газонасыщенных мёрзлых породах при разработке методик по проведению исследований и нормативных документов по их использованию в инженерно-геологических и проектных работах. Рассмотренные материалы свидетельствуют о том, что газонасыщенные мёрзлые грунты являются значительной и важной частью криолитозоны и их изучение должно осуществляться в рамках самостоятельного раздела геокриологии.

Ключевые слова:

многолетнемёрзлые породы, фильтрация газа, пластические деформации, разрывные деформации, напорная фильтрация газа, пневморазрыв, газовые гидраты, газонасыщенные грунты, разложение газогидратов, трещинообразование

Введение

В настоящее время для выделения различных типов мёрзлых пород используются такие показатели как: льдистость, криогенное строение, засоленность, вещественный состав, температура, и др. При этом такой показатель, как газонасыщенность, полностью отсутствует, что оставляет значительную группу мерзлых пород с присущими им специфическими свойствами и процессами вне рамок специального изучения. Строение и свойства мерзлых пород обусловлены взаимодействием твердых, жидких и газообразных компонентов. Основная твердая составляющая - минеральные частицы и лед, жидкая – различные категории воды (свободная, рыхло- и прочносвязанная), газообразная – вся совокупность газов и водяного пара, содержащихся в мерзлых породах. Два первых компонента изучены довольно хорошо, выявлены количественные характеристики, показывающие их влияние на формирование, строение и свойства мерзлых пород. На их основе разработаны различные классификации, проведены исследования механических свойств, закрепленные в нормативных документах, разрабатываются прогнозы поведения пород при различных сценариях изменения климата. Газовая составляющая, ее влияние на строение и свойства мерзлых пород рассмотрена гораздо слабее. При оценке свойств мерзлых грунтов газовую компоненту практически не учитывают, ее роль не рассматривается при проведении проектных и инженерно-геокриологических работ или разработке прогнозов развития

неблагоприятных процессов при изменении внешних условий. Данная тема научных исследований казалась незначительной и имеющей только академический интерес. Отношение к роли газовой составляющей в мёрзлых грунтах можно проиллюстрировать словами Н. А. Цытовича: «Что касается газов, то их роль в мерзлых грунтах сводится лишь к образованию пористости грунтов и в условиях наличия замкнутых газовых вакуолей — к увеличению упругости.» [\[1\]](#). Эта позиция вполне объяснима, поскольку соответствует слабой изученности данной проблемы в середине 20 века. Но в настоящее время с ней уже невозможно согласиться. К концу 20 и в начале 21 веков накопилось уже достаточно данных, чтобы считать значительным влияние газовой составляющей на формирование мёрзлых пород, их свойств и происходящих в них процессов. Выяснилось, что наличие газовой составляющей мерзлых пород ухудшают их прочностные и деформационные характеристики [\[2,3,4\]](#). Было установлено, что при повышении их температуры до значений близких к температурам фазовых переходов, но остающихся в области отрицательных значений, в даже льдистых породах возможна фильтрация газа [\[5\]](#). Выявлено, что эмиссия метана из мёрзлых пород может достигать уровней, способных вызвать значительное и даже катастрофическое потепление нашей планеты [\[6\]](#). Зафиксировано, что при бурении скважин в мёрзлых породах, особенно в пределах месторождений углеводородов, наблюдаются многочисленные газопроявления, выражающиеся в выбросе бурового инструмента, шлама, промывочной жидкости и т.д. Диапазон глубин, с которых происходит большинство выбросов, составляет от 10 до 100 м [\[7,8,9,10\]](#). В последние годы на территории Западной Сибири обнаружены воронки глубиной в десятки метров, связанные с естественными выбросами подземных газов из мерзлых пород [\[11,12,13 и др\]](#). Существуют обоснованные предположения, что подземные газы, двигаясь с больших глубин к поверхности, охлаждаются за счёт адиабатического расширения. При этом их температура понижается до отрицательных значений, что в свою очередь приводит к промораживанию осадков и формированию мерзлоты над газовыми месторождениями севера Западной Сибири [\[14\]](#). Ю.К. Васильчуком проведена большая работа по изучению изотопного состава газов в мерзлых породах, обеспечивающих возможность прямого хронологического сопоставления изотопных записей подземных и наземных льдов и их надёжную возрастную привязку для периода более чем в 40 тыс. лет [\[15\]](#). Ю. Б. Баду были рассмотрены общие закономерности проявления криолитогенеза пород над газовой залежью, где осадконакопление и промерзание отложений сопровождалось их газонасыщением. Им было показано, что воздействие газовой залежи на вышележащую толщу пород приводит к развитию криогенной геосистемы, определяемой, как «Криогенная толща в газоносной структуре» [\[16\]](#). Внутримерзлотные газы в мёрзлых породах встречаются не только в свободном состоянии, но и в виде газогидратов, которые могут формироваться при эпигенетическом промерзании газонасыщенных осадков. Установлены условия их сохранения в верхних горизонтах мёрзлых пород в метастабильном состоянии. Определены давления, создающиеся в грунтовой массе при разложении различных газов и их смесей [\[17,18,19,20 и др.\]](#)

Следует отметить, что существующие представления о незначительной роли грунтовых газов в формировании мёрзлых пород и их свойств исключает из теории криолитогенеза значительный объём процессов, связанных с наличием газовой составляющей. В практическом отношении это затрудняет разработку нормативных документов и технологий проведения инженерно-геологических работ на территориях распространения газонасыщенных мёрзлых пород. В настоящее время имеющиеся данные о накоплении газовой фазы и её влиянии на процессы, происходящие в

немёрзлых, промерзающих, мёрзлых и оттаивающих породах фрагментарны и ограничены. Необходим их комплексный анализ, учитывающий возникновение газовой компоненты, её концентрацию и локализацию, неоднородность термобарических полей и формирование различного рода деформаций в талом и мёрзлом массивах. Этому и посвящена предлагаемая статья.

Источники поступления газа и причины формирования газонасыщенных зон

Биохимические процессы в осадках

Наиболее распространённой причиной образования газа в осадочных породах являются биохимические процессы, связанные с разложением органики в результате жизнедеятельностью бактерий. Интенсивность естественной биохимической газогенерации, являющейся источником биогенных газов, зависит от фациальных условий осадконакопления. Концентрация биогенного газа в локальных зонах возможна за счёт пузырькового механизма миграции, который реализуется в случае, когда в анаэробных условиях микроорганизмы выделяют газы, которые не успевают посредством диффузионного механизма отводиться от мест генерации в атмосферу. В этом случае концентрация газа становится столь велика, что превышает его растворимость, в связи с чем возникает газовая фаза, формирующаяся в виде газового пузырька. Находя пути наименьшего сопротивления и совершая колебательные движения, пузырёк газа движется в область меньших давлений, равномерно распределяясь в толще осадков. Таким образом, формируется региональный фон углеводородных газов. Если отвод газа затруднён, то могут формироваться газонасыщенные зоны, приуроченные к линзам проницаемых пород или к сводам антиклинальных структур перекрытых газонепроницаемыми породами (литологические ловушки). В этих случаях давление газа будет непрерывно возрастать до тех пор, пока не достигнет значений, при которых нарушится целостность кровли [\[21\]](#). При техногенных нарушениях это приводит к выбросам газа. Рассмотрим несколько примеров. На территории Санкт-Петербургского региона при бурении скважин на глубинах 8-40 м были зафиксированы десятки газогрязевых выбросов, иногда сопровождавшихся возгоранием газа. Период длительного выделения газов продолжался от нескольких минут до 6 часов [\[22\]](#). Позднечетвертичные неглубокие биогенные газовые резервуары были обнаружены и эксплуатируются в промышленных целях в прибрежной зоне залива Ханчжоу, северная провинция Чжэцзян, восточный Китай. Здесь врезанные долины были заполнены речными песчаными отложениями и затем в послеледниковый период перекрыты морскими осадками. (рис. 1). Все промысловые месторождения газа приурочены к песчаным пластам мощностью от 3.0 до 7.0 м, залегающим на глубине 30 – 60 м, которые перекрыты газонепроницаемыми глинами. Быстрое осаждение вышележащих отложений морских мелководных отложений богатых органикой обеспечило не только обильные источники газа, но и хорошие условия для его накопления [\[23\]](#).

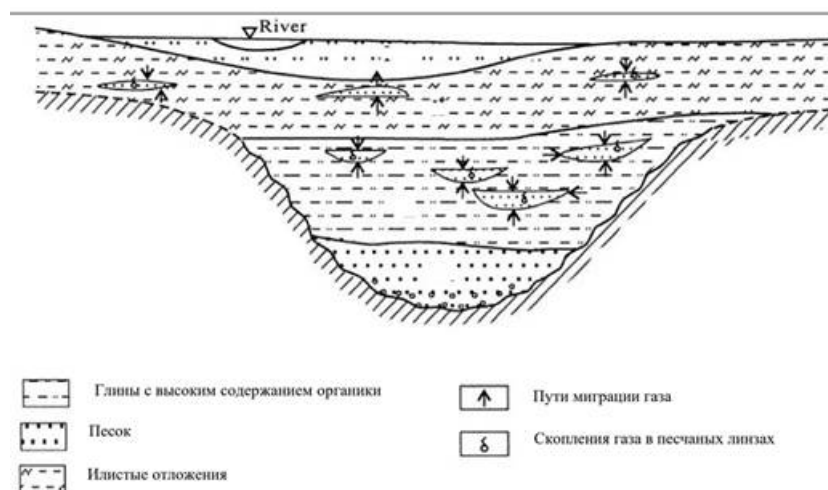


Рис. 1. Схематический разрез погребенной палеодолины с включение локальных скоплений газа в песчаных линзах [\[23\]](#).

Очевидно, что формирование газонасыщенных зон с повышенным давлением происходит в верхних грунтовых толщ на глубине первых десятков метров.

Поступление газа по тектоническим нарушениям

Рассеянные биогенные газы, образующийся в донных отложениях, выделяясь в придонную воду, формируют в большинстве случаев только региональный фон углеводородных газов. При подтоке газа из глубинных горизонтов, в том числе из нефтегазовых залежей, в верхней части разрезов и придонном слое воды формируются зоны с его аномальным содержанием. Они возникают в тех случаях, когда над формирующейся газовой залежью, получают развитие трещиноватые зоны в перекрывающих её породах и возникает подток углеводородных газов. Например, фоновые значения содержания метана в пробах донных осадков Карского моря составляют 0,001 мл/кг, а модальные значения содержания этого газа в пределах газовых аномалий (как правило, приуроченных к зонам разрывных нарушений) превышают фоновые более чем в 100 раз [\[24\]](#). А.И. Обжиров, изучая распределение природных газов в осадках дальневосточных морей [\[25,26\]](#), пришёл к выводу, что биогенный метан, образующийся *in situ* в донных отложениях, формирует только региональный фон углеводородных газов, имеющий положительную корреляционную связь с количеством в осадках органического вещества. При этом аномальные концентрации углеводородных газов, связаны с поступление из внешних источников за счет миграции глубинного газа. В зонах тектонических нарушений газ по системе трещин и разломов мигрирует к поверхности из нижележащих горизонтов. В этом случае могут формироваться области повышенного газонасыщения, в которых концентрация газов может намного превышать фоновые значения. В дальневосточных морях в придонном слое воды фоновые концентрации метана обычно составляют 0.00007-0.00009 мл/л. Над месторождениями нефти и газа содержание метана в 10-100 раз превышает фоновые значения. В придонной воде над Лунской структурой (Охотское море) наблюдается содержание метана в центральной части структуры 0.011 мл/л, что на два порядка превышает фон. Столь высокая аномалия связана с сильной нарушенностью структуры - верхней части осадочного чехла. В районе выхода газа в керне донных илистых осадков, обнаруживаются пустоты и включения газогидратов. [\[25, 26\]](#)

В порах субаквальных осадков газ содержится в свободном (в виде пузырей), адсорбированном, защемлённом и растворённом состоянии. Ориентировочные оценки

свидетельствуют, что в глинистых грунтах содержание газа не превышает 5%. В песчаных грунтах (в газовых карманах) оно может достигать значительно больших величин. В морских осадках газовая компонента представлена в основном метаном, углекислым газом, сероводородом, кислородом, азотом. [27]

Криогенный фактор концентрации внутригрунтового газа

Наряду с рассмотренными выше причинами накопления газа, (биохимические процессы и поступление газа из нижележащих горизонтов) мощным фактором формирования газовых скоплений является криогенная концентрация газа. Данный механизм обусловлен отжатием примесей, в том числе и газовых из формирующихся кристаллов льда. Создаются так называемые криогенные напоры, обуславливающие значительное перераспределение концентрации газа в мерзлых породах. При этом давление в газе будет возрастать. Концентрируясь в благоприятных зонах скопления свободного газа или в виде газогидратов могут существовать длительное время [28]. Данные закономерности перераспределения газа при промерзании не зависят от генезиса отложений прослеживается на всех структурных уровнях криолитосферы.

Г.Н. Краевым с коллегами [29] в ходе лабораторного моделирования миграции газа при одностороннем промерзании насыщенных метаном суглинистых и песчаных грунтов было установлено, что в суглинках метан при промерзании сконцентрировался в верхней части образца за счет миграции влаги (и газа вместе с ней) к фронту промерзания. Вода переходит в лёд, а выделившийся газ заполняет поры в грунте. В нижней части образцов влажность глинистых грунтов и соответственно содержание растворённого газа уменьшилось. В песках, где количество связанной воды, способной к миграции незначительно, наблюдалось отжатие газа из зоны льдообразования к газонепроницаемой подошве образца. Результаты эксперимента позволили авторам сделать вывод о том, что распределение метана в эксперименте – результат специфической криогенной миграции газа вместе с поровым раствором.

Полученные в лабораторных экспериментах результаты подтвердились в ходе изучения динамики криогенной концентрации метана при неравномерном промерзании деятельного слоя. В сезонномёрзлом слое, несмотря на его незначительные вертикальные размеры и кратковременность существования, формируются локальные зоны повышенного содержания газа. Исследователи установили, что средние значения концентрации метана у подошвы СТС – около $0,002 \text{ см}^3/\text{г}$ формируются за счет биогенного продуцирования. При этом наблюдаемые местами локальные максимумы, многократно превышают средние значения, что может быть объяснено только при допущении возможности перераспределения газа по латерали. Это происходит при формировании неровностей фронта промерзания, обусловленных неоднородностями поверхностных условий, или различиями увлажнения и вещественного состава отложений. В вогнутых частях подошвы слоя сезонного промерзания формируются своеобразные газовые микроловушки. Например, для формирования концентрации $0,015 \text{ см}^3/\text{г}$ на одном из изученных участков потребовался биогенный метан не только из промерзающего вышележащего модельного столбика почвы объемом 5 дм^3 , но еще из 11-12 соседних [29].

Такие же закономерности обнаружены и изучении эпигенетически промерзших отложениях старичных озёр. Промерзание начинается после заполнения озёрной котловины осадками или осушении при дренировании. Формирование газонепроницаемого промёрзшего слоя приводит к повышению давления газа в талой

зоне. При этом под слоем мерзлого грунта, в более глубоких горизонтах талых осадков, метаногенез продолжает развиваться. Направленное промерзание вытесняет большую часть метана вниз в грубозернистые слои с значительным объёмом свободных пор, где он накапливается в свободном виде. Установлено, что содержащийся в талых осадках газ, может при эпигенетическом промерзании озёрных осадков смещаться вниз на десятки метров и накапливаться в литологических карманах [\[30\]](#). Следует добавить, что карманами, в которых могут накапливаться отжимающиеся при промерзании талых осадков могут быть обусловлены не только литологией, но и морфологией фронта промерзания.

При фронтальном эпигенетическом промерзании больших территорий (например, вышедших из-под арктического океана), фронт промерзания и льдообразования отжимает как свободный, так и выделяющийся из водорастворенного состояния вниз по разрезу, вглубь промерзающего массива.

Наибольшее содержание газа в мерзлых породах наблюдается при сочетании нескольких разнородных факторов: тектонического, связанного с образованием локальных тектонических структур, обуславливающих движение газа к поверхности и накопление его в куполах; гидрологического, связанного с движением мощных потоков грунтовых газонасыщенных вод к поверхности; геологического, связанного с формированием мощной водонасыщенной, слоистой, разновозрастной, полигенетической толщи; криогенного, обусловившего эпигенетическое промерзание литологически разнородной водо- и газонасыщенной толщи, в результате чего формируется сложно построенный парагенез криогенных образований, включающих пластовые льды, льдистые мёрзлые породы, криопэги, горизонты газогидратов и карманы напорных свободных газов [\[31\]](#). Такое сочетание разнородных факторов наблюдается на газоконденсатных месторождениях Ямала (Бованенковское ГКМ, Харасавейское ГКМ и др.)

К зонам локального повышенного газонасыщения за счёт криогенной концентрации газа относятся и многолетние бугры пучения (гидролакколиты). Данные образования формируются при эпигенетическом промерзании озёрных отложений (чаще всего термокарстовых). В этих условиях промерзание происходит по типу «закрытых систем», характерными особенностями которых является возникновение криогенного напора. Он приводит к концентрации воды и растворённого газа в локальной зоне под растущим бугром. Апикальные части бугров бывают обогащены крупными воздушными включениями, за счёт выделения воздуха при льдообразовании в результате чего здесь образуются обширные воздушные полости. Перекрывающие газонасыщенные зоны низкотемпературные льдистые мёрзлые породы не позволяют газам, находящимся под давлением поступать в атмосферу.

Распространение газонасыщенных пород в криолитозоне

Газонасыщенные породы встречаются по всей области криолитозоны, при этом содержание газа в них отличается большим разнообразием. Наблюдается значительный разброс значений содержания газа в мерзлых породах даже в пределах одного генетического типа. Различия минимальных и максимальных значений может отличаться на порядок. В материалах исследований А. А. Васильева, И. Д. Стрелецкой, В. П. Мельникова, Г. Е. Облогова приведены значения содержания метана в мерзлых породах и льдах на ключевом участке Марре Сале, расположенном на западном побережье Ямала (табл. 1, 2). [\[32\]](#)

Таблица 1. Концентрация метана (ppmV) в мерзлых породах [32]

Генезис	Болотный, озерно-аллювиальный, эоловый			Озерно-аллювиальный			Прибрежно-морской			Морской, прибрежно-морской		
Состав	Пески (6)*			Пески, супеси (7)			Пески, супеси, суглинки (10)			Глины, суглинки (8)		
CH ₄	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.
Динамический метод (7)	—	—	—	115	217	14	3329	5248	104	1682	2215	1148
Метод "head space" (24)	68	212	18	186	460	15	1009	1969	97	2884	5515	585

Примечание. * В скобках количество образцов.

Таблица 2. Концентрация метана (ppmV) в повторно жильных (ПЖЛ) и пластовых (ПЛ) льдах [32]

Таблица 1. Концентрация метана (ppmV) в подземных льдах

Генезис и возраст льда	ПЖЛ голоценовые, МИС 1 (10)*			ПЖЛ неоплейстоценовые, МИС 2 (15)			ПЛ I типа (15)			ПЛ II типа (4)		
Концентрация метана	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.
Динамический метод (32)	95	227	17	680	4461	26	6197	17113	26	6117	23352	160
Метод "head space" (12)	96	346	3	105	357	3	10084	12292	7877	—	—	—

Примечание. * В скобках количество образцов.

ПЛ 1 типа приурочены к контакту морской и континентальной толщ. Лед содержит много песчаных и супесчаных включений, рассеянных в толще льда. ПЛ 2 типа залегает внутри суглинистой толщи морского генезиса. Здесь лед слоистый, представлен чередованием чистого стекловидного льда и прослоев, обогащенных включениями глинистого материала.

Минимальные концентрации метана характерны для песков и в среднем составляют 70–200 ppmV. Максимальные концентрации метана присущи супесчаным и глинистым отложениям, а средние концентрации в них достигают 1000–3000 ppmV. Обнаружено увеличение концентрации метана при возрастании содержания органического углерода, который и лимитирует метаногенез во вмещающих отложениях. Минимальная концентрация метана присуща голоценовым ПЖЛ, в среднем менее 100 ppmV. В неоплейстоценовых ПЖЛ концентрация в среднем до 700 ppmV. Высокие концентрации метана в ПЖЛ объясняются авторами его продуцированием непосредственно в ПЖЛ или попаданием с талой водой. В пластовых льдах обоих типов концентрация метана на порядок выше, чем в ПЖЛ, – до 10000 ppmV. Исследователи делают вывод, что столь высокие концентрации метана не могут быть объяснены метаногенезом анаэробных бактерий во льду. Его высокое содержание в ПЛ объясняется миграцией из вмещающих пород и концентрирования в ледяном теле. Наиболее вероятной причиной миграции может быть криогенная концентрация подземных вод в зону формирования ледяного тела, вместе с содержащимися в них газами в ходе эпигенетического промерзания.

М. Ю.Чербунина, изучавшая содержание газов в мерзлых отложениях центральной Якутии получила аналогичные результаты. По её данным распределение метана в мерзлых породах и льдах отличается большой изменчивостью по глубине и в плане, как между различными геологическими слоями, так и в пределах одного горизонта, причем разброс значений возрастает с увеличением средней концентрации. Наблюдается значительный разброс значений содержания газа в мерзлых породах одного генезиса, так на пример в аласных отложениях р. Лена содержание метана колеблется от 17,2 ppmv (0,0017%) до 234 346 ppmv (23,4%), то есть отличается более чем на 4 порядка.

Наблюдаемая неравномерность распределения газа может быть отчасти связана с условиями метаногенеза, однако основной причиной накопления отложений с высоким содержанием метана является его значительное криогенное перераспределение. После промерзания перераспределение метана не происходило, несмотря на возникающие градиенты его концентрации. [\[33\]](#)

А. И., Гресовым и А. В. Яцук, исследовавшим газосодержание мёрзлых пород в Якутии, выделено региональное генерационно-аккумулятивное "хранилище" метана, углекислого газа, углеводородных газов, водорода, приурочное к Ленскому угленосному бассейну. К характерным особенностям углеметановых бассейнов относится формирование аномальных концентраций метана в приповерхностном горизонте: от 0.5 до 12.5% в интервале глубин 8–16 м. В интервале глубин 20–40 м в скважинах зафиксированы газопроявления с концентрациями метана до 24– 47% и дебитом газа до 0.1 м³ /мин. [\[34\]](#)

Газонасыщенные мёрзлые породы в пределах нефтегазовых месторождений

Наибольшее газонасыщение мерзлые пород наблюдается на участках нефтегазовых структур. Геофизические исследования арктического шельфа показало прямую пространственную связь местоположения газонасыщенных зон в то числе и в виде газогидратов с антиклинальными поднятиями в осадочном чехле. Сейсмоакустические исследования проведённые специалистами ОАО МАГЭ, на акватории Западно-Шпицбергенской континентальной окраины Баренцева моря показали прямую пространственную связь местоположения зоны газонасыщенных осадков (акустически прозрачное тело) с антиклинальными поднятиями (резкое прерывание корреляции отражающих горизонтов, куполообразные «вздутия» вышележащих горизонтов, наличие характерных помех, «мигрирующих» по пластам, вверх по склону, что дополнительно подтверждается результатами газогидрохимической съёмки, и с зонами повышенной концентрации растворенных углеводородов. [\[35\]](#)

Такая же закономерность распределения газонасыщенных мёрзлых пород прослеживается и в субэкральных условиях. Наибольшее содержание газа в многолетнемёрзлых породах севера Западной Сибири приурочено к приподнятым блокам в виде тектонических валов и сводов. В осадочном чехле севера Западной Сибири эти своды и мегавалы образуют структуры размерами в десятки и сотни километров и амплитудой в сотни метров. [\[36\]](#)

В этом случае газонасыщение обуславливается совместным действием нескольких факторов:

- тектонического, связанного с деформированием пород, приуроченных к локальным тектоническим структурам, что обуславливает движение глубинного газа к поверхности;
- гидрологического, связанного с движением потоков грунтовых газонасыщенных вод к поверхности;
- криогенного, обусловившего эпигенетическое промерзание литологически разнородной, водо- и газонасыщенной толщи, в результате чего формируется сложно построенный парагенез криогенных образований, включающих пластовые льды, льдистые мерзлые породы, криопэги, горизонты газогидратов и «карманы» напорных свободных газов.

В ходе инженерно-геологических работ на трассе железной дороги Обская-Бованенково на участке мостового перехода через р. Юрибей (южный Ямал) в многолетнемёрзлых

породах было пробурено более 200 скважин глубиной от 10 до 53 м. В большинстве скважин наблюдалось выбросы газа, приуроченные к мелкозернистым пескам прибрежно-морского генезиса, перекрытых глинистыми осадками. В скважинах, где проводились геотермические наблюдения, газовыделение фиксировалось в течение года. [37] Иногда газовые выбросы сопровождались горением, длительность которого в одной из скважин продолжалась около месяца. Проведённые Ф. Э. Арэ расчёты показали, что наблюдаемая газовая пористость в суглинках в среднем составляет 5-7%, достигая 10%, а в некоторых случаях до 50%. В песках средняя величина газовой пористости составляла 0,5 %. Изучение газовой составляющей мёрзлых пород позволило исследователю сделать ряд важных выводов: что верхние слои многолетнемёрзлых пород (до 100 м) над нефтегазовыми месторождениями содержат значительное количество свободного газа под избыточным давлением; вместительность свободного газа в многолетнемёрзлых породах могут служить зоны повышенной газовой микро- и макропористости; продолжительные выделения газа из скважин, пробуренных в монолитных многолетнемёрзлых породах, свидетельствуют о их существенной газопроницаемости и возможности фильтрации через них. [7]

Отдельно рассмотрим газонасыщенность мёрзлых пород в районе одного из наиболее изученных месторождений углеводородов - Бованенковского НГКМ. Данное месторождение находится в центральной части п-ва Ямал и приурочено к Бованенковскому локальному поднятию. Многолетнемёрзлые породы представлены преимущественно глинами с песчаными прослоями различной мощности. Практически все газовые проявления на Бованенковском ГКМ приурочены к оторфованным пылеватым пескам, встречающимся в разрезе мёрзлой толщи до глубин порядка 130 м. К песчаным слоям и линзам приурочены газопроявления различной интенсивности и продолжительности. Газ находится в свободной форме или в виде газогидратов. По составу газ на 99% состоит из метана с незначительной примесью азота, диоксида углерода. По содержанию газа на Бованенковском НГКМ выделяются два типа мёрзлых пород. В первом, соответствующем горизонтам, где не наблюдается газопроявлений, содержание газа незначительно и составляет $0,005 \text{ см}^3/\text{г}$. Степень заполнения порового пространства (удельная пористость этих пород, свободная ото льда и незамёрзшей воды) незначительно превышает газосодержание и составляет от 0.86 до 0,95 %, что свидетельствует о свободной форме газовых включений. Второй тип, приуроченный к горизонтам газопроявлений. Газосодержание здесь достигает $0,5 \text{ см}^3/\text{г}$. Учитывая высокую степень заполнения пор влагой (более 98%) это на два порядка превышает удельную активную пористость. Дебиты газовых выбросов колеблются от 50 до $14000 \text{ м}^3/\text{сут.}$, при средних значениях порядка $800\text{--}1000 \text{ м}^3/\text{сут.}$ Такие дебиты и размеры залежей свидетельствуют о том, что в мёрзлых породах существует или формируется мощная сеть каналов, по которым осуществляется фильтрация газа к скважине. Объёмы газа достигают значительных размеров, В одной из скважин (64-П-2) в интервале 72-80 м запас газа был оценён в 490 тыс. м^3 , а площадь газовой залежи в 80 тыс. м^2 . Более 85% газопроявлений зафиксированы на глубинах порядка 60-80 м. Этот горизонт выдержан на площади порядка 120 км^2 и приурочен к породам ямальской серии. [38, 8]

Газ в мёрзлых породах может содержаться в твёрдом виде в форме газогидратов. При эпигенетическом промерзании водонасыщенных отложений происходит отжатие свободного газа из зоны льдообразования. Это обуславливает его накопление в неровностях сформировавшегося газонепроницаемого фронта промерзания. Дальнейшее промерзание приведет к концентрации и сжатию газа, и, при достижении необходимых

термобарических условий, к гидратообразованию.^[10] В результате взаимодействия перечисленных факторов формируются наиболее выраженные газонасыщенные мерзлые породы. Изучение В. С. Якушевым газосодержания образцов, отобранных на Бованенковском ГКМ показало, что объем выделившегося при оттаивании кернов пород с повышенным газосодержанием газа значительно превышал объем свободного порового пространства. В кернах, извлеченных из отложений без газопроявлений, газосодержание при оттаивании, либо соответствовало свободному поровому пространству, либо было значительно меньше (табл. 3) Выделение газа происходило активно в виде крупных пузырьков до 2-3 мм диаметром и многочисленных мелких пузырьков до 0,5 мм, образующих цепочки и рои.^[19]

Таблица 3. Результаты определения газосодержания при оттаивании образцов мерзлого керна ненарушенного сложения из криолитозоны на Бованенковском ГКМ.^[10]

Номер скважины	Глубина отбора, м	Литология	Степень заполнения пор льдом и незамерзшей водой, %	Свободный поровый объем, см ³ /г	Газосодержание при оттаивании, см ³ /г
Газопроявляющие горизонты					
58-П-2	25,0	Суглинок	99	0,001	0,200
	26,0	Песок	99	0,003	0,400
	105,0	Суглинок	99	0,001	0,190
58-П-1	27,0	Песок	99	0,002	0,250
	100,0	Суглинок	99	0,002	0,250
Горизонты без газопроявлений					
52-П-3	25,0-26,0	Суглинок	90	0,05	0,002
	94,0-95,0	Суглинок	99	0,001	0,008
58-П-1	20,0-21,0	Песок	95	0,02	> 0,001
	79,0-80,0	Песок	94	0,03	0,004
	99,0-100,0	Супесь	86	0,07	0,005
	109,0-110,0	Песок	91	0,04	0,004

Это дает все основания полагать, что хотя бы часть исследованных образцов содержит реликтовые газовые гидраты в поровом пространстве.

Данное предположение позволяет объяснить ряд противоречивых фактов в отношении газовой составляющей мёрзлой толщи Бованенковского ГКМ. Как известно, эпигенетическое промерзание газонасыщенных дисперсных пород вызывает криогенное концентрирование газа и значительном повышении порового давления в промерзающем массиве.^[19,30,39,40] Следовало бы ожидать, что повышенное поровое давление должно было бы наблюдаться и в мёрзлых породах Бованенковского ГКМ. Но для них, как отмечается в ^[8], характерны низкие значения пластового давления с дефицитом относительно гидростатического от 0,92 до 0,21. Всего лишь на пяти испытанных объектах пластовое давление превышало гидростатическое (1,03—1,14). Данное

противоречие может быть объяснено именно формированием газогидратов при эпигенетической промерзании газонасыщенных осадков. В. С. Якушевым предложена следующая схема. Фронт промерзания газонасыщенной толщи осадков, опережает фронт гидратообразования. В мёрзлой породе образуется закрытая система. Удаление газа из мёрзлой породы прекращается. Происходит криогенная концентрация газа, что приводит к повышению давления в сформировавшихся газовых карманах и переходу части газа в гидратное состояние. При этом поровое давление падает. [19]

Повышенное содержание газа наблюдается в самых верхних горизонтах мёрзлых пород. Геохимические исследования рассеянных углеводородных газов, проведенные на территории Бованенковского и Харасавейского нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ), показали неравномерность их концентрации в верхних горизонтах многолетнемерзлых пород. В скважинах глубиной до 3 м, расположенных в контуре месторождений, значения концентраций углеводородных газов оказались более чем в 2 раза выше, чем за пределами контуров (табл. 4) [41]. Здесь в глинистой покрывке, в пределах контура залежи, широко распространены высоконапорные мелкие скопления углеводородов. При удалении от свода аномальность пластового давления в этих скоплениях уменьшается, а за контуром залежи исчезают газопроявления и в покрывке [4]. Данное распределение значений концентрации углеводородных газов отражает общие закономерности газонасыщенности мерзлых пород в районах газовых месторождений. Вероятно, данное распределение концентрации газа связано с тем, что еще до промерзания в не промёрзших субаквальных осадках, над тектоническими газоносными наблюдается повышенное содержание газов, что было рассмотрено выше. Начавшееся промерзание лишь зафиксировало это.

Таблица 4. Средние значения геохимических показателей поверхностных отложений Бованенковского и Харасавейского ГКМ. [41]

Углеводородный газ (УВГ)	Содержание УВГ, см ³ /кг	
	в контуре газоносности	за контуром газоносности
CH ₄	338.18	141.84
C ₂ H ₆	0.4225	0.2703
C ₃ H ₈	0.23148	0.2471
C ₄ H ₁₀	0.0671	0.0398
C ₅ H ₁₂	0.0782	0.0719
C ₆ H ₁₄	0.005	0.0003
CH₄ (в % от суммы УВГ)	98.72	98.63

Рассмотренные выше материалы показали, что по степени газонасыщения и форме нахождения газовой составляющей мерзлые породы отличаются разнообразием. На основании рассмотренных выше материалов предварительно можно выделить несколько групп мёрзлых пород по содержанию газа, давлению в нём и процессам, связанным с перераспределением газа. В первую входят отложения, в которых наблюдается фоновое распределение газа перед промерзанием. В глинисто-суглинистых отложениях свободный газ содержится в диспергированной форме (в виде отдельных пузырьков в поровом пространстве). Значительного перераспределения газовой составляющей в ходе промерзания и ее криогенной концентрации не происходит. Газонасыщенность мерзлых пород составляет около 5% (5-7% [7], 4-5% [4], а содержание газа составляет порядка 0,002 – 0,005 см³/г. Газ находится в свободной форме в виде заземленного в

грунтовых порах и капиллярах. Давление газа соответствует гидростатическому. При повышении температуры мерзлых пород выше 5-7°C возможно перераспределение газа без нагрузки за счёт фильтрации по капиллярам. При нагрузках фильтрация газа начинается при более низких температурах. Во вторую группу входят мерзлые породы, в которых размеры газовых полостей превышают размеры естественных пор. Содержание газа 0,2 – 0,5 см³/г и более, а количество газа может превышать свободную пористость на 2-3 порядка [8], при этом показатель пористости может достигать 50% [7].

Вторая группа включает мёрзлые грунты, в которых давление газовой составляющей превышает гидростатическое. В том случае размер пузырьков газа превысит толщину капилляров, при этом сплошность грунтового массива сохраняется. Дальнейший рост давления вызовет отжатие грунтовых частиц за границу газового пузырька, что приведёт к образованию каверн размером превышающих толщину капилляров. Свободный газ будет находиться под давлением, параметры которого определяется многими факторами (количеством органики, обводнённостью осадков, геологическим строением, приуроченностью к газовыводящим каналам, интенсивностью криогенной концентрации др.) и значительно превышать гидростатическое. Газонасыщенность отложений может достигать 50% и более. В рассмотренных условиях он в свободной форме рассеян по грунтовому массиву или сконцентрирован в «газовых карманах». В мёрзлых породах наибольшее давление газ в мёрзлых породах достигает при разложении, содержащихся в них, газогидратов. Оно составляет около 2,5 МПа [20]. При вскрытии в процессе бурения газонасыщенных горизонтов происходят выбросы газа. При достижении определённого соотношения между прочностью породы и давлением газа в естественных условиях может произойти пневморазрыв грунтового массива и формированию газового слоя (линзы), воспринимающего вес вышележащей толщи.

Третья группа включает газ находящийся, в мёрзлых породах в твёрдом виде (газогидраты). Она формируется в том случае, когда достигается определённое соотношение между давлением внутригрунтового газа и температурой. При низких температурах значения внутригрунтовых давлений газа понижаются, например для образования газогидратов метана при температурах 0 - -5 °C давление составляет около необходимого для гидратообразования 2.5 МПа [20]. Соответствующие давления могли формироваться в условиях создания криогенных напоров при эпигенетическом промерзании, под ледниками, или на достаточных морских глубинах. Сформировавшиеся в мёрзлых породах газогидраты по своим свойствам близки к подземным льдам.

Формы нахождения газовых включений в талых и мёрзлых грунтах

В глинисто-суглинистых отложениях свободный газ содержится в диспергированной форме (в виде отдельных пузырьков в пористом пространстве) или в тонких проницаемых линзах и прослоях внутри слабопроницаемых глинистых толщ. В песчаных образованиях он встречается в виде локализованных скоплений, сосредоточенных в мини-ловушках (мелких антикалинальных структурах или в головных частях наклонно залегающих малопроницаемых внутренних слоев глинистого состава) [43]. А. Андерсонс соавторами (1998) выделили три типа газовых пузырей в субаквальных осадках (рис. 2) [44]:

- интерстициальные пузырьки – очень маленькие пузырьки в недеформированных интерстициальных поровых пространствах осадка;
- резервуарные пузыри – пузырёк газа, занимающий область недеформируемого твердого каркаса осадка, большую, чем нормальное поровое пространство (пузырь – это

заполненная газом, свободная от жидкости область твердого каркаса осадка);

- газовые пустоты – «полость, которая больше нормального межпорового пространства осадка, содержит только газ и окружена осадком, либо ненарушенным, либо слегка искаженным расширением полости за счет образования пузырька свободного газа».

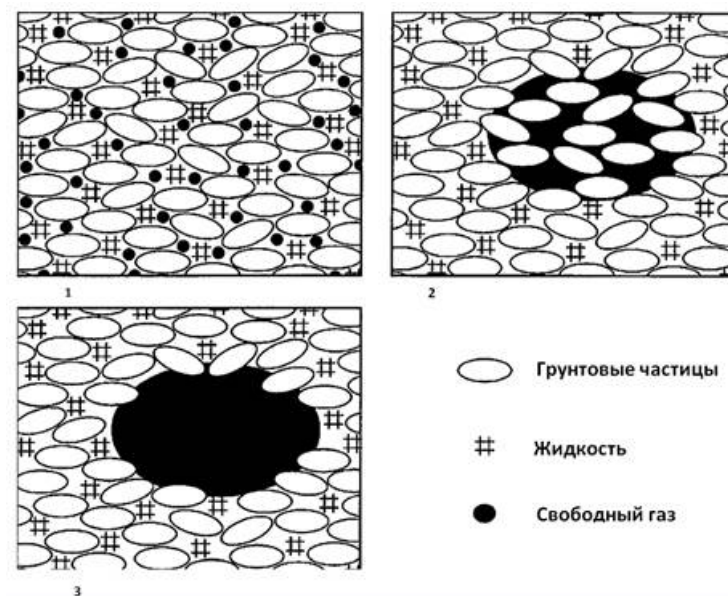


Рис. 2. Три различных типа газовых пузырьков в осадке: Тип 1 – интерстициальные пузырьки; 2–резервуарные пузырьки; пузырьки, вытесняющие осадок, 3 – газовые пустоты. [44]

Большинство газовых пузырьков представляют собой газовые пустоты, размер которых варьируется от 0,5 мм (сферы с объемом, равным объему пузыря) до 50 мм. Большинство из них имеют не сферическую, а «монетообразную» сплюснутую форму, при этом их плоскости ориентированы субвертикально, что предполагает вертикальную миграцию газа [44]. Исследование М.Ю. Токаревым с соавторами [45] осадков Кандалакшского залива Белого моря (глубина опробования до 3 м) показало наличие здесь газонасыщенных осадков. Данные компьютерной томографии кернов показали наличие в толще осадка многочисленных полых трещин субвертикальной ориентировки, обусловленных дегазацией осадка. Газовые включения представлены изометричными, округлыми полостями диаметром около 1 мм и вытянутыми в субвертикальном направлении искривлёнными трещинами длиной до 5 мм и толщиной до 2 мм (рис. 3).

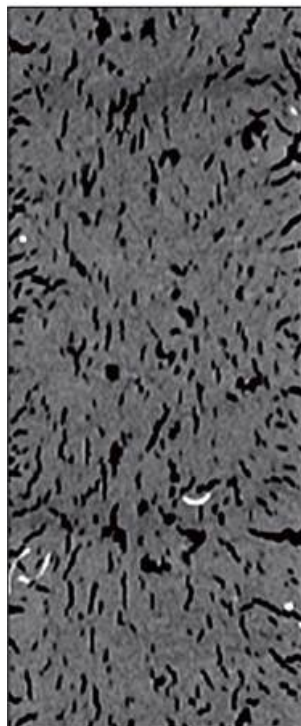


Рис. 3. Фрагмент рентгеноплоскостного среза. Серое — осадок, чёрное — трещины, обусловленные дегазацией осадка (глубина 100–120 см) [\[45\]](#)

В песчаных отложениях пузырьки газа имеют преимущественно изометричную форму (рис. 4)

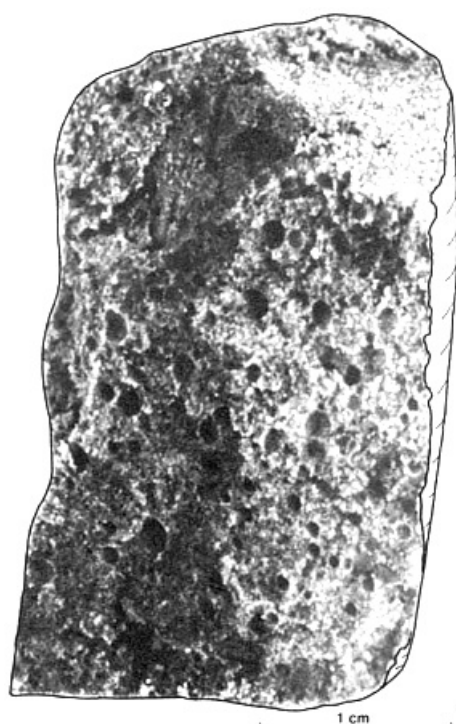


Рис. 4. Образец керна, слабо илистого песка формации Абердин Граунд, отобранного с глубины 59 м ниже морского дна, на котором видны газовые пустоты. Скважина пробурена в районе Южного Фладена, Северное море [\[46\]](#).

По данным Ф.Э. Арэ, изучавшим газонасыщенные мерзлые породы в районе трассы железной дороги Обская-Бованенково, в кернах многих инженерно-геологических скважин зафиксированы горизонтально ориентированные макропустоты

чечевицеобразной формы толщиной до 12 мм. Иногда наблюдались скопления мелких субгоризонтальных ломанных пустот толщиной до 1 мм [7]. Отличительной особенностью газонасыщенных мерзлых пород на территории Бованенковского НГКМ является наличие каверн изометричной формы диаметром 5-8 мм и глубиной до 7 мм. Стенки каверн гладкие, сами каверны часто заполнены фирноподобным снегом [38,8].

Значительное газонасыщение отмечается для подземных льдов. К наиболее распространённым относятся льды многолетних бугров пучения. В этом случае газонасыщенные льды формируются при всестороннем промерзании линзы воды, залегающей в основании растущего бугра пучения.

Иногда газонасыщенные льдонасыщенные породы формируются при участии газа, поступающего из больших глубин. Ниже приведены материалы из доклада А. С. Смирнова «Поверхностные проявления флюидодинамических процессов Земли на семинаре Сообщества молодых мерзлотоведов России (PYRNR), посвящённому воронкам газового выброса, состоявшемуся в Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева (ИГЭ РАН) 28.11.2014. На рис. 5. показано строение ледяного ядра многолетнем бугра пучения на месторождении Песцовое Тазовского п-ова, сформированного газонасыщенным льдом из с аномально высоким содержанием водорода (глубина 16 м). Во льду наблюдаются газовые пустоты изометричной формы до 10 мм в поперечнике. В этом случае можно предположить поступление глубинного газа.



Рис. 5. Газонасыщенный лёд из горизонта с высоким содержанием водорода (глубина 16 м) в многолетнем бугре пучения на месторождении Песцовое Тазовский п-ов. Фото А. С. Смирнова.

Большое разнообразие газовых включений наблюдается в обнаруженных в 2014 году воронках газовых выбросов в долине реки Еркута Яха. На рис. 6 приведено строение газонасыщенного льда, разбитого трещинами на отдельные блоки. Газ распределён отдельными гроздьями мелких воздушных пузырьков. В этом случае наиболее вероятным процессом газонасыщение является поступление газа под напором в ранее сформировавшийся лёд.



Рис. 6. Газовые скопления в виде гроздьев, лёд в стенке воронки газового выброса на реке Еркутаяха (Южный Ямал) Фото Ю. Станиловской.

Скважина пробуренная вблизи Ямальского кратера (центральный Ямал), на глубине 5,8 – 6,3 м вскрыт слой плотного газонасыщенного (молочного льда) разбитого вертикальными и горизонтальными трещинами и извилистыми каналами субвертикальной ориентировки (рис. 7).



Рис.7. Газонасыщенный (молочный) лёд вблизи воронки газового выброса глубина 5,8 – 6,3 м (Ямальский кратер Фото В. Хилимонюк [\[47\]](#)).

Глыбы льда, выброшенные из воронки, расположенной в районе р Се Яха на северо-востоке полуострова Ямал, состоят из чередующихся слоёв белого газонасыщенного льда и ледогрунта (рис. 8, 9)



Рис. 8. Глыбы газонасыщенного льда выброшенного при образовании воронки газового выброса в районе р. Сеяха (северо восток п-ва Ямал) Фото А. И. Сеницкого [\[48\]](#).



Рис. 9. Обломок газонасыщенного пористого льда выброшенного при образовании воронки газового выброса в районе р. Сеяха (северо восток п-ва Ямал) Фото А. И. Сеницкого.

На вертикальных поверхностях воронки газового выброса, получившей название Ямальский кратер наблюдаются газовые включения разных размеров и морфологии, образующие вытянутые цепочки или изометричные скопления (рис. 10).



Рис. 10. Газонасыщенные мёрзлые породы слагающие стенки Ямальский кратер. Июль 2014г. Фото В. И. Богоявленского [\[49\]](#).

Газогидраты, залегающие в грунтовых толщах, по внешнему виду ничем не отличаются от ледяных образований.

Давление газа в мёрзлых грунтовых массивах

Газовая составляющая является наиболее подвижной частью мёрзлых пород. Газ реагирует на малейшее изменение температуры и давления увеличивая или уменьшая свой объем. Обладая высокой сжимаемостью, газ может накапливаться в имеющихся порах и грунтовых полостях. Рассмотрим некоторые оценки величин давлений, зафиксированных в мерзлых породах, и возможные причины их формирования.

Дж. Р. Маккаем, изучавшем многолетние бугры пучения (пинго) на Арктическом побережье Канады, были измерены давления в водяных линзах, залегающих в основании бугров. Полученные значения гидростатического напора не превышали 0,35 МПа, при мощности мёрзлой толщи около 25 м. Данного давления было достаточно для деформирования мёрзлой кровли и формирования пинго, но недостаточно для развития взрывного процесса. [\[50\]](#)

В многолетнемерзлых угленосных породах Анадырского, Беринговского, Аркагалинского, Ленского и других бассейнов и перекрывающих их мёрзлых отложениях, часто фиксируются скопления свободного газа с давлением до 0.2–0.3 МПа [\[34\]](#).

В 1986–1990 гг. На полуострове Ямал при бурении массива мерзлого грунта в районе мостового перехода через р. Юрибей с глубины 26 м был отмечен выброс бурового инструмента весом около 150 кг на высоту 12 м. По расчетам Р.Г. Кальбергенова (устное сообщение), необходимое давление составляло 2.5 МПа. Согласно расчетам В.И. Богоявленского и И.А. Гарагаша [\[11\]](#), для разрушения мерзлой крышки воронки газового выброса «Ямальский кратер» мощностью 8 м достаточно давления в 1.25 МПа. Близкие значения (1.74 МПа) были получены В.П. Мерзляковым [\[31\]](#). По оценкам С.Н. Булдовича [\[51\]](#) давление 1.5 МПа и температур ниже -1.4°C достаточно для образования стабильных углекислых газогидратов. Соответственно повышение температуры выше данных значений приведет к разложению газогидрата и формированию соответствующих

давлений углекислого газа в толще мерзлых пород. Для метана при температурах в диапазоне от -5°C до -0°C равновесное давление в системе газ — вода (лед) — гидрат находится в диапазоне 2.2-2.6 МПа [20]. То есть максимально возможное давление при разложении газогидрата метана не будет превышать 2.6 МПа. Для Бованенковского НГКМ установлено, что объем выделившихся газов в горизонтах активного газовыделения, на 2-3 порядка превосходит пространство в порах пород, которое газ мог занимать в свободной форме [52]. Используя известные соотношения давлений и объемов газа (закон Бойля Мариотта), можно определить, что давление газа в порах должно достигать значений 2-3 МПа, это вполне соответствует предположениям, что он находился в клатратной форме. В ненарушенном состоянии газ в твердой форме соответствует ледяным образованиям мерзлой толщи, аномальных давлений при этом не наблюдается. При снятии давления или повышении температуры мерзлых пород начинается разложение газогидратов. При этом создаются значительные давления, которые приводят к деформации мерзлых пород и фильтрации газа в них. При возрастании количества газа до определённых значений его отвод не будет обеспечиваться фильтрацией, что обуславливает повышение давления в локальной зоне до значений, обеспечивающих нарушение сплошности мерзлых пород. Данный процесс можно определить как пневморазрыв. Термин пневморазрыв используется достаточно широко в инженерной геологии и применяется при использовании технических средств для разрыва горной породы сжатым газом [53]. При формировании значительных давлений газа пневморазрыв будет наблюдаться и в естественных условиях. Кроме повышения температуры и снятия давления разложение газогидратов может наблюдаться при увеличении минерализации поровых растворов мерзлых пород. При повышении температуры мерзлых пород толщина пленок связанной воды с меньшей концентрацией солей увеличивается, ионы солей за счет диффузии мигрируют в мерзлый грунт [54, 55]. То есть газогидраты начнут разлагаться и выделять свободный газ под большим давлением еще до оттаивания мерзлой породы.

Наблюдается определённая зависимость между количеством газов, давлением в газовой составляющей и процессами в грунтовом массиве. В группе с малым содержанием ($0,002 - 0,005 \text{ см}^3/\text{г}$) и давлением (около 4 кг/см^2) основным механизмом перераспределения газовой составляющей является фильтрация газа по капиллярам за счёт продавливания (выдавливания) связанной воды. Если содержание газа и давление в нём будут выше, то процессы, обеспечивающие перераспределение газовой составляющей, во многом будут определяться прочностными характеристиками мерзлых грунтов. В том случае, когда силы сцепления будут обеспечивать монолитное состояние мерзлого массива, и его незначительные деформации, то фильтрация газа по мере его рассеивания ослабевает. В этом случае будет наблюдаться стадия затухающей ползучести, протекающая при напряжениях, не превышающих длительной прочности грунта и характеризующаяся постепенным уменьшением скорости необратимых деформаций, в пределе стремящихся к нулю.

При повышении давлений до значений, при которых сопротивление мерзлого грунта будет меньше сдвигающего напряжения, то произойдёт пневморазрыв грунта, начнут развиваться трещины. В этом случае пластические или разрывные деформации в массиве мерзлых пород будут основной причиной фильтрации газа. При этих условиях наблюдается стадия незатухающей ползучести характерная для фазы сдвигов, когда уровень действующих напряжений превышает длительную прочность грунта и в свою очередь подразделяется на три стадии. Зарождение и развитие ползучести обуславливается развитием микротрещин, разрушением агрегатов частиц и ростом

других дефектов структуры мерзлого грунта под нагрузкой [56]. В данном случае реализуется деформационно-фильтрационный механизм перераспределения газа, использованный при построении феноменологической модели формирования воронок газового выброса [13]. В случае реализации данного механизма мёрзлый массив сохраняет свою целостность, в нём наблюдаются лишь локальные деформации, не изменяющие общий структурный рисунок. При дальнейшем возрастании давления, могут возникнуть условия для неустановившейся ползучести. Скорость деформирования, в которой, в отличие от затухающей ползучести, стремится не к нулю, а к некоторой постоянной величине. Вторую стадию — установившейся ползучести, или пластичновязкого течения практически с постоянной скоростью деформирования. При достижении деформаций определенной величины переходит в третью стадию прогрессирующего течения. На стадии прогрессирующего течения необратимые деформации достигают предельного значения. Наблюдается ускоряющееся развитие микротрещин, возникновение новых микротрещин с переходом их в макротрещины, что обуславливает разуплотнение мерзлого грунта [1] и развития локальных зон неустановившегося течения в массиве мёрзлого грунта. Движения возникшей текучей массы будет направлено в сторону наименьшего сопротивления, как правило, вверх. При разрушении кровли может произойти пневматический взрыв, выброс газа вместе с газонасыщенным ледогрунтовым материалом и образование воронки. В качестве обоснования перехода установившегося движения газонасыщенного ледогрунта во взрывной процесс рассмотрим данные по скорости роста некоторых бугров, предшествующих взрывам, формирующим воронки газового выброса, описанные в литературе. Бугор на месте Ямальского кратера развивался около 60 лет, его высота около 6 м средняя скорость роста бугра около 0,1 м/год [57]. Высота Сеяхинского кратера 1,7 м, сроки образования 2015-2017 гг. [58]. Скорость роста около 0,8 м/год. Бугор на месте Еркутинского кратера (долина реки Еркута на юге Ямала) сформировался 1-2 года, он был обнаружена группой биологов под руководством А. Соколова в 2016 г. Взрыв произошёл весной 2017 г. Высота бугра составляет 2-3 м [59]. Скорость роста 1-1,5 м/год. Для сравнения, скорость роста крупных бугров пучения обычно составляет 0,015 — 0,025 см в год [60]. Согласно оценкам Э. Д. Ершова в начальный этап роста многолетних бугров максимален и составляет 0,1 - 0,3 м/год, а затем, по мере роста многолетнемерзлого ядра и увеличения самого бугра, уменьшается до 0,01-0,02 м/год [61]. Скорость роста бугров пучения связана непосредственно перед взрывом отражает стадию, при которой кровля под воздействием давления, создаваемого внутригрунтовым газом начинает интенсивно деформироваться и в конечном итоге разрывается. Рассмотренные материалы фрагментарны и немногочисленны, поскольку общая теория, рассматривающая различные стадии газодинамических процессов в мерзлых породах, в настоящее время отсутствуют.

Изучение процессов перераспределения газа в грунтовой массе в лабораторных условиях

Изучение свойств газонасыщенных мёрзлых грунтов в естественных условиях в настоящее время не проводится вследствие отсутствия соответствующих методик и слабой изученности самого объекта. В последние годы начинает развиваться изучение данной проблемы в лабораторных условиях. Работы ведутся по разным направлениям. Это и изучение влияния газовой составляющей мёрзлых грунтов на их механические свойства, и исследование фильтрации газа в мёрзлых грунтах, и моделирование развития газовых полостей за счёт пневморазрыва грунтового массива.

Сотрудниками Лаборатории грунтоведения Института геоэкологии РАН было проведено изучение динамики газовыделения из мерзлых грунтов. Исследования проводились на грунтах южной части Ямальского полуострова. Испытания проводились на твердых и тугопластичных суглинках, а также песках. Содержание газов в образцах (растворенных, адсорбированных и свободных) достигало 4-5%. В ходе испытаний удалось выяснить, даже минимальные внешние нагрузки оказывают значительное влияние на процесс газовыделения в мерзлых грунтах при повышении температуры (рис.11). В песчаных грунтах температура начала выделения газовых включений при увеличении величины объемного сжимающего давления постепенно снижается до -8°C (при давлении 0,2 МПа). Наибольшая интенсивность газовыделения наступает при температуре 0°C при давлении 0,05 МПа, -1°C при 0,1 МПа и $-1,5^{\circ}\text{C}$ при 0,2 МПа. При этом динамика выделения газа при действии сжимающих нагрузок имеет более выраженный пик максимальной интенсивности газовыделения, и газовыделение прекращается при более низкой температуре. В суглинках температура начала выделения газа постепенно снижается при увеличении величины объемного сжимающего давления от -7°C при давлении 0,05 МПа до -8°C (при давлении 0,2 МПа). Наибольшая интенсивность газовыделения наступает при температуре -3°C при давлении 0,05 МПа, -4°C при 0,1 и 0,2 МПа. Действие внешних нагрузок снижает температуру начала газовыделения и влияет на его динамику при изменении температуры. При этом максимум объема выделяющихся газов возрастает при увеличении сжимающего давления [3].

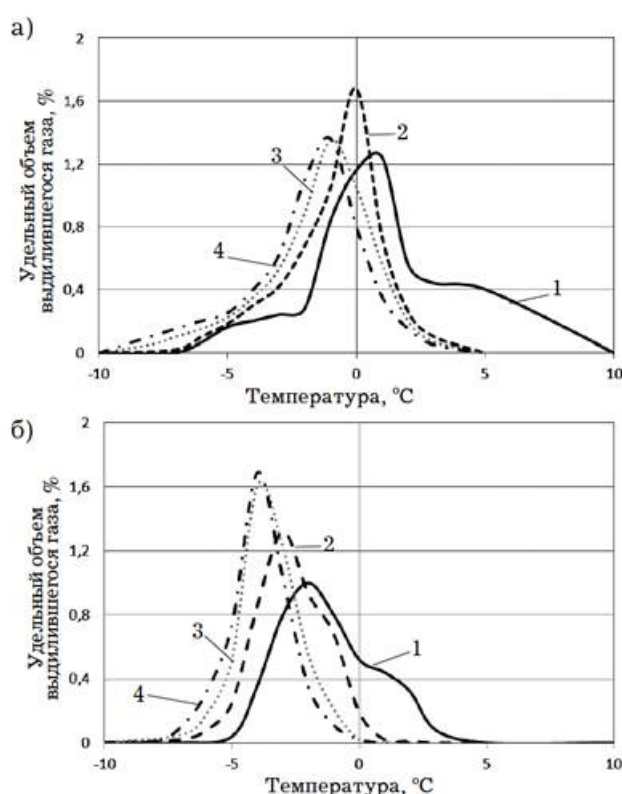


Рис. 11. Зависимость объема газа, выделившегося под действием сжимающих нагрузок (1 - 0,001 МПа, 2 - 0,05 МПа, 3 - 0,1 МПа, 4 - 0,2 МПа) от температуры: а) пылеватый песок; б) суглинок [3].

Было установлено, что изменение прочности мерзлых газосодержащих грунтов под действием температурного фактора происходит закономерно, в соответствии с характером газовыделения в них. При свободном газовыделении снижение прочности начинается уже при отрицательных температурах (-5°C), а показатели прочности

достигают своих минимальных значений при достижении температуры оттаивания. При этом чем больше прикладываемая нагрузка, тем быстрее грунт начинает реагировать и изменять свойства, теряя несущую способность. Установлено, что снижение прочностных свойств грунтов зависит от количества газовых включений в них (табл. 5). Из приведенных данных следует, что в одинаковых температурных условиях (температура грунта -5°C) прочностные свойства одного и того же грунта зависят от содержания в них газов. Снижение прочности грунтов обусловлено изменением их строения, происходящим в результате газовыделения, начинается уже при 2 %-ном содержании газовой компоненты, при его увеличении до 8 % протекает наиболее интенсивно [3, 4].

Таблица 5. Изменение прочностных свойств мерзлых суглинков при температуре -5°C в зависимости от содержания в них газовой компоненты. [62]

Содержание газовой компоненты в грунте	Коефф. внутреннего трения (tg φ)	Угол внутреннего трения (φ , $^{\circ}$)	Сцепление (C, кПа)
газовая компонента отсутствует	0.88	41	58
2%	0.77	38	40
5%	0.32	18	19
8%	0.16	9	10
10%	0.13	7	8
15%	0.09	5	6
20%	0.08	5	5

Сотрудниками ИГЭ РАН и Кафедры геокриологии МГУ проводились лабораторные исследования фильтрации газа сквозь мерзлые образцы. Газ подводился по замороженному в образец штуцеру, под давлением около 0.3 МПа. Испытания проводились на образцах льда различной солёности и каолина с начальной влажностью близкой к верхнему пределу пластичности, что обеспечило высокую льдистость после промораживания. Температура образцов повышалась от -9°C до значений близких к 0°C . При температуре около -1°C в образцах пресного льда и льдистого каолина наблюдалась фильтрация газа. Подробное описание наблюдаемых процессов приводится в ряде публикаций [5, 31 и др.], здесь же рассмотрим некоторые процессы в зоне контакта мерзлых образцов с газоподводящим каналом. В нижней части образца на контакте со штуцером подачи газа формировалась веерообразная газонасыщенная зона высотой около 2 см и шириной 3-4 см., к которой приурочены радиально расходящиеся трещины (рис. 12).

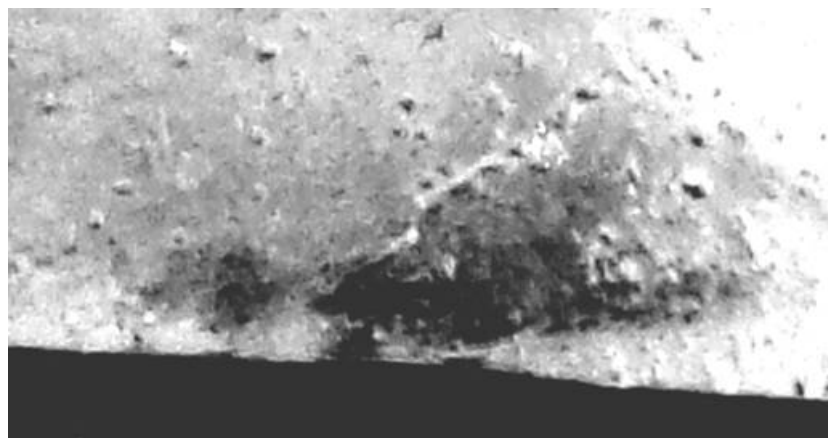


Рис.12 . Нижняя часть образца примыкающая к штуцеру, подводящему газ. Съёмка в отражённом свете. Фото А.Н. Хименкова [5]

Съёмка структуры льда нижнего слоя льда в поляризованном свете показала, наличие многочисленных следов пластических и разрывных деформаций. Наиболее значительные деформации льда наблюдаются в зоне прилегающей к штуцеру подачи газа (рис. 13). Здесь сформировалось зона деформации льда с сильнодислоцированными, перемятыми и раздробленными кристаллами. Видны пластические деформации кристаллов, волнообразные границы, вдавливание кристаллов друг в друга, будинаж трещины и зоны дробления, на контактах кристаллов цепочки воздушных включений.

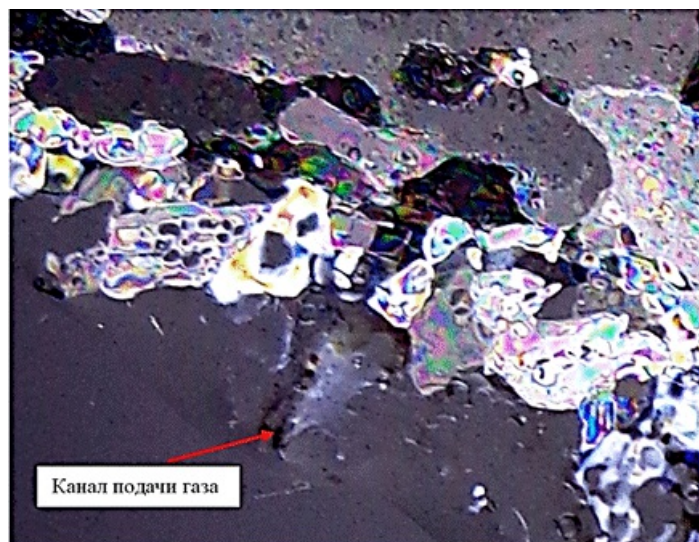


Рис. 13. Структура льда зоны льда, непосредственно примыкающего к штуцеру подачи газа. Съёмка в поляризованном свете. Фото А.Н. Хименкова [5]

Ближние процессы наблюдались и при воздействии сжатого газа на мёрзлый образец каолиновой глины. В нижней части газонасыщенного образца, вблизи штуцера подачи газа общий рисунок ледяных шлиров сохраняется. Газ, подаваемый в нижнюю часть образца, в начале действует на грунт (лёд) как своеобразный штамп. В зоне грунта, примыкающей к каналу подачи газа мёрзлый грунт значительно деформирован пластическими и разрывными деформациями, разделяющими грунтовый массив на отдельные блоки; вытянутые в субвертикальном направлении каналы, частично заполненные льдом (рис. 14).

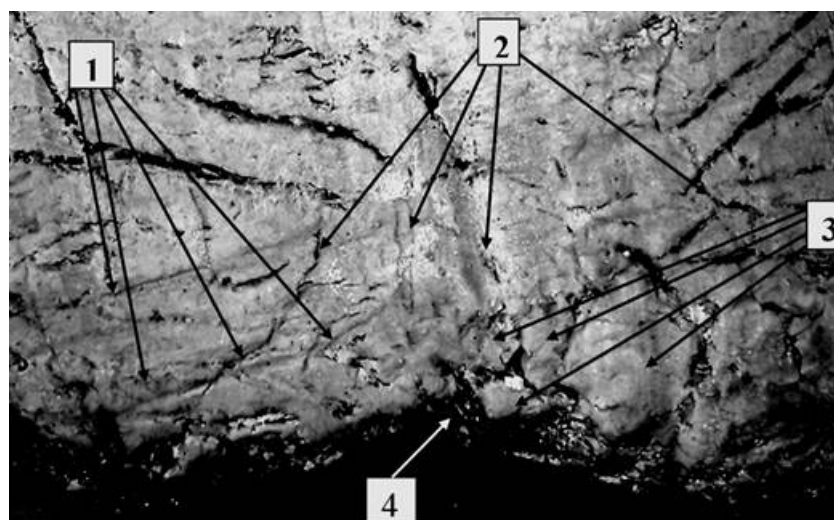


Рис. 14. Нижняя часть газонасыщенного образца. Деформационные образования грунта вблизи штуцера подачи газа: 1 - пластические деформации, 2- трещины, 3-грунтовые блоки, разделённые трещинами, 4-место контакта канала подачи газа с грунтом. Фото

А.Н. Хименкова [\[5\]](#)

Мёрзлый грунт вблизи канала подачи газа насыщен газовыми включениями диаметром около 1 мм. Обилие газовых включений, приводит к тому, что в локальных зонах, мёрзлый грунт приобретает сотовое строение (рис. 15).

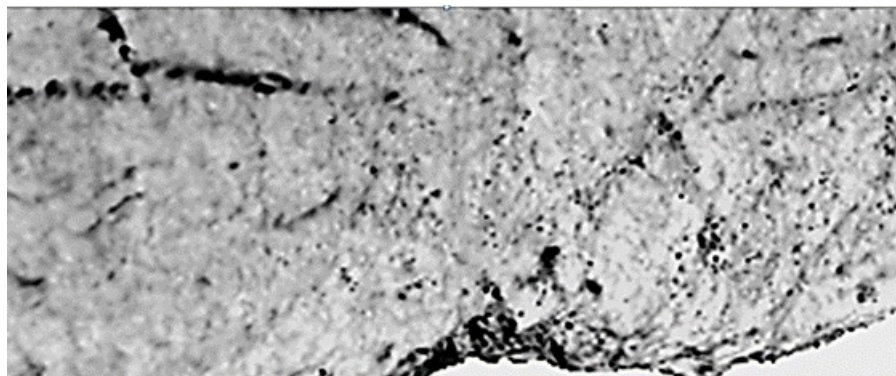


Рис.15 . Распределение газовых включений в нижней части образца, примыкающей к каналу подачи газа. Фото А.Н. Хименкова [\[5\]](#)

Выше зоны внедрения в образце формируется постепенно увеличивающаяся область непрерывного фильтрационного потока общей направленности к верхней части образца. При этом формируется сеть расходящихся от центра (штуцера подающего газ) веерообразных каналов. Сплошной поток газа в данной зоне трансформируется и по системе трещин и деформаций в грунте поступает в вышележащие слои в виде мелких ветвящихся флюидов. Газ, подаваемый в нижнюю часть мёрзлого грунтового образца, вследствие извилистости поровых каналов и разной площади их реального сечения, будет рассеиваться, искать наиболее слабые зоны и продавливаться по ним. Слоистые криотекстуры, расположенные над зоной внедрения, были разорваны многочисленными, извилистыми каналами толщиной в доли мм. Вытянутые газовые пузырьки приурочены к локальным деформациям первичного криогенного строения, не нарушая общее положение ледяных шлиров (рис. 16) [\[31\]](#).

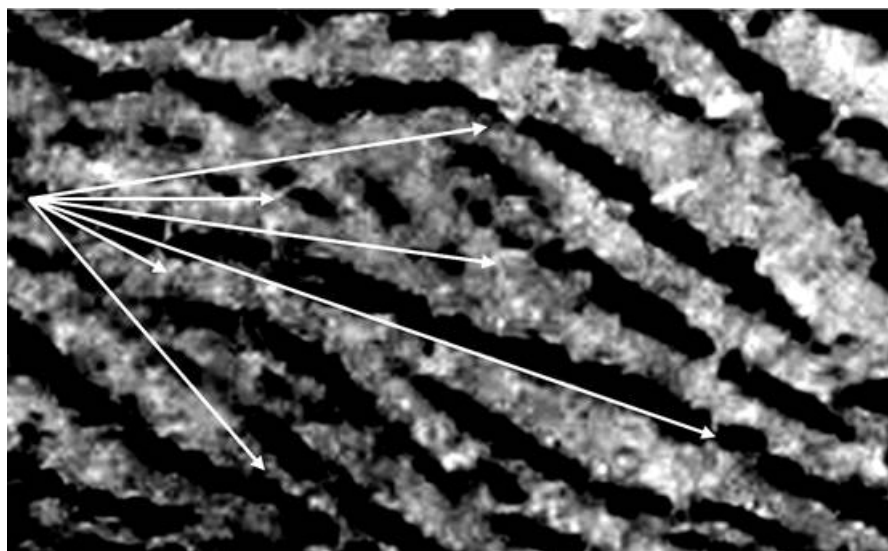


Рис. 16. Фильтрационные каналы, прорывающие первичные слоистые. Фотография сделана в отражённом свете. Светлые полосы - каолиновая глина, темные – шлиры льда. Стрелками указаны места нарушения сплошности ледяных шлиров. Фото А.Н. Хименкова [\[31\]](#).

Проведённые исследования позволяют сделать некоторые предварительные выводы. Подача газа под давлением приводит к возникновению локальных деформаций, по которым разрозненные потоки газ в виде мелких пузырьков (в доли мм) расходится от центра, где находится штуцер, к краевым частям образца. От сформировавшейся системы субветрикальных ветвящихся каналов, пузырьки газа распространяются по всему массиву образца. Движение газовых пузырьков представляется в виде хаотических колебаний, способствующих выбору наиболее ослабленных зон. Поэтому образовавшиеся каналы имеют изогнутую, червеобразную форму. В высокотемпературных условиях, (температура образца около $-0,5^{\circ}\text{C}$) лёд, является более твёрдым компонентом по сравнению с мёрзлым грунтом, поэтому первичный рисунок ледяных шлиров в целом сохранился, хотя первичные ледяные элементы частично и были деформированы. При этом на контактах ледяных шлиров с грунтом наблюдается увеличение количества газовых ячеек

Механизм распределения газового потока в мёрзлом грунте подобен механизму гидравлической дисперсии, процессу рассеивания вещества в пористой или трещиноватой среде на границе жидкостей с разными концентрациями [\[63\]](#). Оба процесса обусловлены неоднородностью поля скоростей движения вещества обусловленной извилистостью поровых каналов в породе и разной площадью их реального сечения (рис. 17.). Можно предположить, что при движении газа сквозь мёрзлые образцы, будет развиваться схожие процессы.

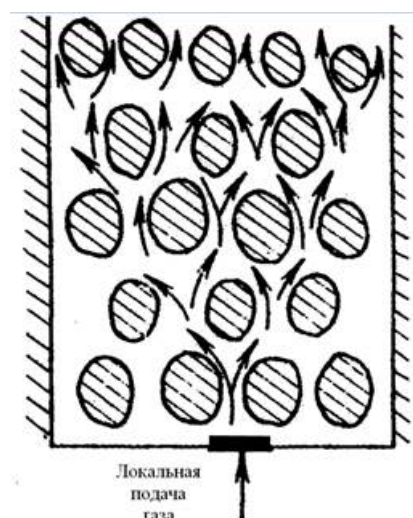


Рис.17. Рассеяние газа в мёрзлом грунтовом образце,

подаваемого из локального источника (с использованием материалов.

Согласно представлениям В.М. Гольдберга и Н.П. Скворцовой в глинах связанная вода заполняет весь объем мелких пор и большую часть крупных. Под воздействием приложенного давления связанная вода "продавливается". Такое продавливание начинается в крупных порах, т. е. той части воды, которая наименее связана с твердой поверхностью. По мере увеличения перепада давления в движение будут вовлекаться и более связанная вода в мелких порах [\[64\]](#). Повышение температуры в тонкодисперсном мёрзлом грунте, до значений близких к фазовым переходам, приведёт к резкому возрастанию в них незамёрзшей воды. Вследствие этого, локальные газовые струи находящиеся под давлением, воздействуют на рыхлосвязанную воду и ледяные шлиры, деформируя их

Китайскими исследователями были проведены эксперименты по изучению процессов,

связанных с напорным воздействием газа на грунтовую толщу [\[65\]](#). Под слоем воды была сформирован массив, состоящий из слоя песка, перекрытого мелкозернистым илом. В песчаный слой подавался под давлением воздух. В результате пневморазрыва на границе песка и ила формировался газовая полость (газовый мешок). Процесс образования газового мешка экспериментаторы разделили на три стадии: начальную, позднюю и конечную. Образование газового мешка начинается с появления поперечной трещины (рис. 18), приуроченной к границе песка и ила. Затем трещина начинает расти в продольном направлении, что вызывает расширение полости и поднятие верхнего мелкозернистого слоя, а избыточное давление остаётся практически неизменным (рис. 19). По мере увеличения объема газа осадки будут вытесняться. В илистом грунте наблюдается формирование пластических деформаций, происходит смещение слоёв относительно друг друга. На заключительной стадии развития газового мешка начинают развиваться разрывные деформации в виде вертикально и наклонно ориентированных трещин. По ним в воду отводится газ из газового мешка, в котором избыточное давление рассеивается.

В естественных условиях при формировании аномально высоких пластовых давлений за счёт газов, содержащихся в мёрзлых породах, происходят аналогичные процессы. Над газонасыщенной зоной также формируется область пластических и разрывных деформаций. В итоге газ или постепенно фильтруется в атмосферу, или в виде пневматического взрыва выбрасывает мёрзлую кровлю на поверхность, формируя воронку газового выброса. Процессы, сопровождающие формирование данных образований, более подробно рассмотрены в ряде публикаций. [\[11, 12, 13, 31 и др.\]](#)



Рис.18. Формирование продольной трещины [\[65\]](#).



Рис. 19. Газовый мешок (в нижней части фотографии) и вызванные его формированием пластические и разрывные деформации грунта [65].

Оценивая в целом результаты лабораторного моделирования напорного воздействия газа на талые и мёрзлые грунты можно отметить некоторые общие признаки. Прежде всего, это формирование локальной области повышенного давления. В зависимости от соотношения давления газа и прочности грунтового массива в нём развивается серия парагенетических процессов. К ним относятся пластические деформации без нарушения сплошности и пневморазрывы, приводящие к развитию серии трещин и даже образованию полостей, заполненных газом.

Обсуждение

В предыдущих разделах было показано, что распределение газа в мёрзлых грунтах, его проявления, формы нахождения, давления отличаются большим разнообразием. Это затрудняет изучение и понимание роли газонасыщения, как криолитологического фактора в целом, так и в решении частных проблем: закономерности формирования газовых скоплений в мёрзлых толщах, определение физико-механических свойств газонасыщенных мёрзлых пород, процессы в промерзающих, мёрзлых и оттаивающих породах, структурные особенности газонасыщенных мёрзлых пород и др. Казалось бы данные проблемы должны решаться в рамках геофизиологии. Тем не менее, в рамках научного направления, изучающего часть литосферы с отрицательной температурой отдельного раздела, посвящённого газовой компоненте, нет.

К настоящему времени единственным примером обобщения и систематизации газовой составляющей мёрзлых пород является классификация газового компонента пород криолитозоны предложенной Е. М. Чувилиным с соавторами [66].

Ими выделяются три основных формы нахождения газа по фазовому состоянию сорбированный, (адсорбированную и абсорбированный) растворенный, свободный (защемлённый и подвижный).

Сорбированный (адсорбированный) газ, приуроченный к поверхности льда и органоминерального скелета. Его количество невелико.

Газогидраты относятся к абсорбированным газам, является кристаллическим веществом (клатратным соединением), в котором молекулы газа входят в полости ледяного каркаса. Нарушение термодинамических условий (повышение температуры, снятие давления) может приводить к разложению газогидратов с выделением газа, объем которого на 2-3 порядка превышает объем пор.

Сорбированный угольный газ характерен для многолетнемёрзлых углей, его количество зависит от стадии их метаморфизма и может достигать 90% от объема всего угольного газа.

Растворённый газ содержится в поровом растворе охлажденных пород, а также в пленках незамёрзшей воды, и может достигать первых десятков процентов от объема поровой воды.

Свободный газ находится в порах мерзлого грунта, не занятых льдом и незамёрзшей водой. Он присутствует в породах до промерзания и его содержание значительно возрастает вследствие криогенной концентрации. Данная форма газа присутствует в 2 видах, защемлённого газа и подвижного. Перераспределение последнего лимитируется коллекторными свойствами мерзлых пород.

Как показали материалы в предыдущих разделах, наибольшим влиянием на свойства мёрзлых пород оказывает свободный газ. Это наиболее подвижная часть газовой составляющей, которая чрезвычайно чувствительна даже к небольшим изменениям температуры и давлений в мерзлых толщах. Кроме того, свободный газ сжимается. То есть, не меняя первоначального объема пор и строения самой грунтовой толщи, его количество может увеличиваться с одновременным возрастанием давления. Или уменьшаться, при создании условия для фильтрации. Защемленные газы в порах грунта часто находятся под давлением, создаваемым разными причинами, например движением фронта промерзания, фазовыми переходами в промерзающей породе (кристаллизационный давлением), увеличением гидростатического давления, увеличением температуры и др. В состоянии равновесия это давление равно давлению в жидкой фазе, контактирующей с газом, и соответствуют поровому давлению. Величина порового давления влияет на многие физико-механические свойства грунтов, в частности на их прочность и сжимаемость под нагрузкой. Сжимаясь, пузырьки газов уменьшают свой объем и при определенном соотношении диаметра и размера пор могут перейти из защемленного состояния в свободное, что может сопровождаться резким прорывом газов из пор грунта и сбросом порового давления [\[67\]](#). Правильнее называть свободный газ, перемещающийся в грунтовой тоще подвижным, поскольку защемлённый газ также относится к свободной форме.

Защемлённый пузырёк газа в капилляре или поре можно считать закрытой системой, поскольку при этом состоянии происходит, массообмена ни с соседними участками мёрзлого грунта, ни с грунтовыми водами, ни с атмосферой. В том случае, когда пузырёк газа получает возможность перемещаться в грунтовой массе, система газ-грунт становится открытой. При этом резко меняются физико-механические свойства самой грунтовой толщи. Ещё в 50х годах прошлого столетия в работах Ф. Гассманна предлагалось при рассмотрении деформаций пористых сред (грунтовых массивов) вводить два предельных состояния среды. В первом из них пористая среда является «открытой системой», гидростатическое давление в порах всегда неизменно. Во втором

состоянии среда ведет себя как «закрытая» система, относительное движение жидкости или газа исключается [68, 69]. При данном переходе строение и свойства пород будут изменяться. В этом случае нарушаются структурные связи, обеспечивающие монолитность и прочность массива. Развиваются деформации и трещины. В ранее газонепроницаемой мёрзлой толще будут формироваться потоки фильтрующегося сквозь неё газа. Если поток газа будет достаточно интенсивен, то процесс его истечения приобретёт взрывной характер. Гидратосодержащие мёрзлые породы, также можно рассматривать как закрытые системы. При нарушении равновесных термодинамических условий, при нагревании или сбросе давления, начнётся разложение газогидратов с высвобождением больших объёмов газа, находящегося под большим давлением. Если вмещающие породы будут достаточно прочными, и газ не удаляется, то процесс диссоциации быстро затухает. При деформировании вмещающих пород и фильтрации газа в окружающее пространство закрытая система переходит в открытую. В грунтовом массиве могут возникнуть условия для неустановившейся ползучести, вплоть до стадия незатухающей ползучести и даже прогрессирующего течения.

Из теории фильтрационной консолидации известно, что даже незначительное газонасыщение приводит к перекрытию капилляров, что предопределяет повышение порового давления и замедление процесса консолидации под нагрузкой. Это ведет к взвешиванию грунта, уменьшению сил трения, ослаблению связей между частицами грунта. Например, метан, образующийся на болотах, а также в морских и озерных осадках, может скапливаться в виде мелких газовых пузырьков, повышая поровое давление и снижая водопроницаемость отложений. С этим, во многом, связана низкая плотность молодых осадков [70]. С.И. Рокосом был проведен анализ изменения физико-механических свойств газонасыщенных осадков Арктических морей с аномально высоким внутрипластовым давлением. Было установлено, что повышенное пластовое давление снижает литостатическое (бытовое) и влияет на напряженно-деформированное состояние грунтового массива. Это выражается в снижении прочности и плотности при одновременном увеличении текучести, сжимаемости и пористости, что делает газонасыщенные грунты с избыточным внутрипластовым давлением неустойчивыми к внешним динамическим нагрузкам и служит одной из причин многочисленных естественных деформаций. Это происходит в случае наличия покрывающих газонасыщенную толщу. При снижении внешнего давления или повышении температуры, газ, скопившийся в «мини-ловушках», расширяется. Это вызывает смятие и выжимание к поверхности вмещающих и вышележащих отложений. Когда давление в газонасыщенном горизонте достигает некоторого критического значения, вероятно сопоставимого с сопротивлением недренированному сдвигу осадков данной толщи (около 5-30 КПа), происходит деформация. При вскрытии таких интервалов газ улетучивается, пластовое давление падает, что и вызывает разупрочнение грунта. В газонасыщенных горизонтах, не экранированных слабопроницаемыми слоями, давление газа не значительно отличается от гидростатического. При вскрытии этих интервалов скважинами существенного снижения давления не происходит и, соответственно, свойства грунтов изменяются лишь в зависимости от вещественного состава и степени диагенетических преобразований [43].

В условиях повышения температуры мерзлых грунтов давление, «защемлённого газа» в порах, будет расти, что в свою очередь приводит к их разуплотнению, уменьшению объёмного веса и соответствующему снижению прочности. [71,72]. Начинают развиваться система парагенетически связанных процессов: увеличение содержания незамёрзшей воды, появление рассольных ячеек, формирование микротрещин за счёт неравномерных

тепловых деформаций минерального скелета и льда, объёмного изменения газовых включений.^[73,74] В области отрицательных температур близких к значениям интенсивных фазовых переходов, количество рыхлосвязанной воды в капиллярах резко возрастает, часть ее может переходить в свободную. Газовые включения, расширяясь, образуют систему фильтрационных каналов между собой. Это приводит к повышению газопроницаемости, в результате чего из непроницаемых мерзлых грунтов может происходить выделение газа ^[3].

Механизм фильтрации газа, в этом случае, представляется следующим. В газонасыщенных породах с высоким содержанием воды, удерживаемой за счёт капиллярных сил поровые каналы перекрыты водяными барьерами, а газ находится в диссипированном состоянии. До достижения некоторого порогового предельного значения перепада давления, движения газа через пористую породу не происходит. При перепаде давления превышающего пороговое части барьеров представленные рыхло связанной водой деформируются и открывают часть поровых каналов для фильтрации ^[75]. В мёрзлых породах барьером является перекрытие пор льдом, образующимся при промерзании воды в капиллярах породы. При повышении температуры часть льда перекрывающего капилляры переходит в рыхлосвязанную воду. Создаётся возможность, находящегося под давлением свободного газа, продавливая и отжимая её мигрировать в область меньших давлений.

Данные процессы могут оказывать влияние на устойчивость инженерных сооружений. На некоторых газовых скважинах Бованенковского и Харасавэйского НГКМ отмечается увеличение сжимаемости многолетнемерзлых пород при повышении их температуры без перехода через границу оттаивания. Это повлекло за собой развитие деформаций грунтового основания с риском перехода в недопустимое состояние. Отмечается, что добывающие предприятия в Арктическом регионе ранее не сталкивались с данным процессом ^[76]. Можно обоснованно допустить, что возникновение просадок при повышении температуры газонасыщенных мерзлых пород, широко распространенных на данных территориях, может быть связано с выдавливанием свободного газа из зоны воздействия инженерных сооружений. Его фильтрация в атмосферу, приводит к выделению парниковых газов, к выбросам в скважинах и пневматическим взрывам, формирующим воронки газового выброса. Особенно усиливается воздействие свободного газа при разложении газогидратов. В этом случае, внутри мёрзлой толщи, выделяется огромное количества газа. При этом сплошность породы нарушается за счёт пластических и разрывных деформаций.

Рассмотренные в статье материалы показывают важность учёта влияния газовой составляющей на свойства мёрзлых газонасыщенных грунтов. Крайне необходимо выработать подходы к оценке влияния газовой составляющей, особенно находящейся в форме свободного газа, на физико-механические свойства мёрзлых грунтов. Тем не менее, данный вопрос слабо отражён в как в научных публикациях, так и в нормативных документах. В Своде Правил 11 – 114 – 2004 «Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений»^[77] лишь отмечается, что при инженерно-геологических изысканиях в районе нефтегазовых месторождений следует устанавливать в толще донных отложений наличие грунтов со скоплением газов и аномально высоким пластовым давлением (АВПД), В СП 11-102-97 «Инженерно-экологические изыскания для строительства»^[78] рассматриваются только вопросы, связанные с токсичностью и взрывоопасностью биогаза, поступающего в подвалы сооружений. О комплексном влиянии газонасыщенных

грунтов на их физико-механические свойства грунтов, в том числе и мёрзлых, в российских нормативных документах больше не сказано нигде. А. С. Маштаков, оценивая современное состояние данной проблемы, отмечает, что из-за отсутствия в России стандартов, регламентирующих лабораторные динамические испытания газонасыщенных грунтов, а также использования их результатов при проектировании, инженерных сооружений, методики и состав получаемых результатов исследований определяется только техническим заданием заказчика. При этом техническое задание на оценку влияния свободного газа на грунты не составляется, и данные исследования не производятся, не даётся оценки возможных рисков, нет методических рекомендаций по исследованию газонасыщенных грунтов [\[79\]](#).

Газовая составляющая мерзлых грунтов оказывает существенное влияние на изменение их свойств (плотность, теплоемкость, теплопроводность, проницаемость, физико-механические свойства), поэтому должна учитываться при оценке прочностных и деформационных свойств, и прогнозе поведения мёрзлых массивов при различного рода техногенных воздействиях (изменении температуры, давления при строительстве инженерных объектов, нарушении сплошности при бурении и т.д.). При проведении полевых и лабораторных исследований газонасыщенных грунтов важно учитывать их особенность, отличающую их от других типов мёрзлых грунтов, а именно возможность газа, находящегося в отобранном керне или подготовленном образце выделяться в окружающую среду. Для отбора проб из газонасыщенных грунтов рекомендуется использовать герметичные керноотборники с постоянным объемом керноприемного стакана. При лабораторных испытаниях механических свойств мерзлых газонасыщенных грунтов работы следует проводить в 2 режимах: с возможностью оттока газа и без такой возможности. В первом случае необходимо фиксировать динамику выделения газа и увязывать ее с показателями механических характеристик мерзлых грунтов. Во втором случае необходимо обеспечить герметичность контейнера, в который заключён образец.

Заключение

В настоящее время комплексного изучения газонасыщенных мёрзлых пород не проведено. Это не сделано ни в геокриологии в целом, ни в рамках её частных направлений: механики мёрзлых грунтов, структурной геокриологии, динамической геокриологии и др. Имеются лишь отдельные работы, фрагментарно рассматривающие частные вопросы связанные с газонасыщением мёрзлых пород. До какого-то времени, учитывая сложность проблемы, роль газовой компоненты в формировании строения и свойств мёрзлых пород и влияние на природные процессы можно было не учитывать. Но в современных условиях, когда накопился достаточно большой объем информации о её влиянии на проведение работ при освоении углеводородных месторождений северных территорий и Арктического шельфа, и о значительном вкладе парниковых газов, поступающих из криолитозоны в атмосферу, данную позицию следует кардинально пересматривать. Сложились и теоретические и технологические предпосылки, а главное сформировалась практическая потребность в изучении строения, свойств и процессов в газонасыщенных мёрзлых породах.

Можно выделить следующие основные направления данных исследований:

- изучение особенностей строения газонасыщенных мёрзлых грунтов в лабораторных и полевых условиях;
- изучение особенностей формирования газонасыщенных мёрзлых грунтов в различных геологических и тектонических условиях;

- изучение процессов деформирования газонасыщенных мёрзлых грунтов в естественных условиях при повышенном давлении внутригрунтового газа;
- изучение процессов деформирования газонасыщенных мёрзлых грунтов при техногенных воздействиях;
- изучение прочностных свойств газонасыщенных мерзлых грунтов и величины критических и расчетных сопротивлений;
- разработка классификации и систематизации мёрзлых пород в зависимости от влияния газонасыщения на их свойства;
- исследование миграции газа в мёрзлых грунтах различного состава и льдистости при различных температурах и давлениях;
- изучение условий формирования мёрзлых пород за счёт адиабатического расширения газа (дроссельный эффект);
- изучение процессов связанных с диссоциацией газовых гидратов в природных условиях;
- изучение процессов формирования газовых полостей в мёрзлых породах за счёт пневморазрыва;
- изучение взрывных процессов в мёрзлых породах за счёт пневматического выброса газов;
- изучение процессов формирования положительных форм рельефа (бугров) над локальными зонами газонасыщения в субаквальных и субаэральных условиях;
- изучение осадок мерзлых газонасыщенных грунтов при отжати газовой составляющей в лабораторных и полевых условиях;
- разработка нормативных документов, регламентирующих проведение полевого и лабораторного изучения влияния газонасыщенности на механические свойства мерзлых грунтов.

Библиография

1. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов / Учебн. пособие. М.: Высшая.школа, 1973.
2. Кальбергенов Р.Г., Карпенко В.С., В.Н. Кутергин, Р.В. Собин Р.В. Влияние газовой компоненты на свойства мерзлых грунтов и динамика ее выделения при изменении температуры // Материалы 5-й конференции День науки, М.:Добросвет. 2020. С. 10-17.
3. Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Котов П.И., Р. Собин Р.В. Динамика выделения газа из мерзлых грунтов при изменении температуры и давления // Строительство на многолетнемерзлых грунтах. 2020. №4. С. 15-20.
4. Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Фролов С.И., Р. Собин Р.В. Влияние на прочность глинистых грунтов изменений свойств гидратных пленок при температурных воздействиях // Геоэкология. 2021. № 1. С. 70-79.
5. Хименков А.Н., Кошурников А. В., Соболев П. А. Фильтрации газа в мёрзлых грунтах // ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 4. ГЕОЛОГИЯ 2020. №. 3. С. 97–103.

6. Сергиенко В. И., Лобковский Л. И., Семилетов И.П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов на шельфе Восточно-арктических морей как потенциальная причина метановой катастрофы: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // ДАН. 2012. Т. 446. № 1. С. 1132–1137.
7. Арэ Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли. 1998. Т. II. № 4. С. 42-50.
8. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Т.2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / Под общ. ред. Ю.Б. Баду, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М.: Газпром Экспо, 2013.
9. Мельников П.И., Мельников В.П., Царев В.П., Дегтярев Б.В. и др. О генерации углеводородов в толщах многолетнемерзлых пород // Известия АН СССР, Серия геологическая. 1989. № 2. С.118-128.
10. Якушев В. С., Басниев К. С., Адзынова Ф.А., Грязнова И.В., . Воронова В.В. Признаки наличия регионально газоносного горизонта нового типа на севере Западной Сибири // Нефтяное хозяйство 2014. №11. С. 100-101.
11. Богоявленский В.И., Гарагаш И.А. Обоснование процесса образования кратерогазового выброса в Арктике математическим моделированием // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3. С. 12–17.
12. Лейбман М. О., Кизяков А. И. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа. 2016. № 2. С. 15–24,
13. Хименков А.Н., Станиловская Ю.В. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера. // Арктика и Антарктика. 2018. № 3. С.1-25. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27524.
14. Бембель Р.М., Бембель С.Р., Кашин А.Е., Ласковец Е.Б. Связь очагов активного нефтегазоаккумуляции и глубинных криогенных источников / Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск. Наука. 1997. С. 193–199.
15. Васильчук Ю.К. Изотопные методы в географии. / Часть 2: Геохимия стабильных изотопов пластовых льдов. Том II. М.: Изд-во МГУ, 2014.
16. Баду Ю.Б. КРИОГЕННАЯ ТОЛЩА ГАЗОНОСНЫХ СТРУКТУР ЯМАЛА. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи / М.: Научный мир, 2018.
17. Романовский Н. Н. Основы криогенеза литосферы: Учебное пособие. / М.: Изд-во МГУ, 1993.
18. Чувилин Е.М., Козлова Е.В., Кудашов В.А., Петракова С.Ю. Оценка метастабильности мерзлых гидратосодержащих пород. // Материалы третьей конференции геокриологов России. Том 1. Физико-химия, теплофизика и механика мерзлых грунтов. М. 2005. С.292-299.
19. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. / М.: ВНИИГАЗ. 2009.
20. Истомин В. А., Чувилин Е.М., Сергеева Д. В., Буханов Б. А. и др. Влияние компонентного состава и давления газа на льдо- и гидратообразование в газонасыщенных поровых растворах // НефтеГазоХимия. 2018. № 2. С. 33-42.
21. Глаголев М.В., Клепцова И.Е. К вопросу о механизме выхода пузырьков метана из торфяника // ДОСигИК. 2012. Т. 3. № 3. С. 54-63.
22. Краснов И.И. Газы четвертичной толщи предглинтовой полосы Ленинградской области // Природные газы СССР. М.- Л.: ОНТИ НКТП СССР. 1935.
23. Yan-Li Li, Chun-Ming Lin (2010). Exploration methods for late Quaternary shallow

- biogenic gas reservoirs in the Hangzhou Bay area, eastern China. AAPG Bulletin, 94(11), 1741–1759. doi:10.1306/06301009184
24. Портнов А.Д., Семенов П.Б., Рекант П.В. Комплекс высокочастотных сейсмоакустических исследований и морской газо-геохимической съемки как метод обнаружения и локализации углеводородов // Геология морей и океанов: XIX Междунар. научной конф. (школы) по морской геологии. 2011. Т.II. М.: ИО РАН, С. 97-100.
25. Обжиров А.И. Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. М.: Наука, 1993.
26. Обжиров А. И., Телегин Ю.А., Окулов А.К. Газогеохимические поля и распределение природных газов в дальневосточных морях // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 1. С. 66-74.
27. Миронюк С. Г., Отто В. П. Газонасыщенные морские грунты и естественные газовыделения углеводородов: закономерности распространения и опасность для инженерных сооружений // Геориск, 2014. №2. С. 8-18.
28. Якушев В.С. МЕХАНИЗМЫ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА В КРИОЛИТОЗОНЕ // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. №4. С. 1-4.
29. Краев Г.Н., Ривкина Е.М. Накопление метана в промерзающих и мерзлых почвах криолитозоны // Arctic Environmental Research. 2017. № 3. С. 173-184.
30. Kraev G, Schulze E-D, Yurova A, Kholodov A, Chuvilin E, Rivkina E Cryogenic Displacement and Accumulation of Biogenic Methane in Frozen Soils // Atmosphere. 2017.
31. Хименков А.Н., Власов А.Н., Брушков А.В., Кошурников А.В. и др. Геосистемы газонасыщенных многолетнемерзлых пород. М.: Геоинфо, 2021.
32. Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Мельников В.П., Облогов Г.Е. Метан в подземных льдах и мерзлых четвертичных отложениях Западного Ямала // ДАН. 2015. № 5. С.604–607.
33. Cherbunina M. Y., Shmelev D. G., Karaevskaya E. S. Methane content and its relationship with the microbial community of the upper layers of permafrost in central Yakutia // Innovation in Geology, Geophysics and Geography-2017. Pero Moscow, 2017. P. 25–26.
34. Гресов А. И., Яцук А. В. Газовая зональность и газоносность многолетнемерзлых отложений угленосных бассейнов Восточной Арктики и прилегающих регионов //Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2013. №. 5. С. 387-398.
35. Захаренко В.С., Шлыкова В.В., Тарасов Г.А. Особенности формирования газогидратов на континентальной окраине Западного Шпицбергена // Разведка и охрана недр. 2010. № 8. С. 6-9.
36. Курасов И. А., Ступакова А. В. Тектоническое строение северной части Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2014. № 4. С. 56–64.
37. Арэ Ф. Э., Боровикова Н. В., Слепышев В. Н. Криопэги в низовьях р. Юрибей на Ямале // Линейные сооружения на вечномёрзлых грунтах. М. Наука. 1990. С 60-67.
38. Бондарев В.Л., Миротворский М.Ю., Зверева В.Б., Облеков Г.И., и др. Газохимическая характеристика надсеноманских отложений полуострова Ямал (на примере Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2008. № 5. С.22-34.
39. Chuvilin E.M., Yakushev V.S., Perlova E.V. Gas hydrates in the permafrost of

- Bovanenkovo gas field, Yamal Peninsula, West Siberia // *Polarforschung*, 2000, vol. 68, p. 215–219.
40. Chuvilin E.M., Davletshina D.A. Formation and accumulation of pore methane hydrates in permafrost: experimental modeling // *Geosciences*, 2018, vol. 8, No. 12, p. 467. doi: [10.3390/geosciences8120467](https://doi.org/10.3390/geosciences8120467).
 41. Бондарев В. Л., Миротворский М. Ю., Облеков Г. И., Шайдуллин Р. М., Гудзен В. Т. Геохимические методы при обнаружении и локализации залежей углеводородных газов (УВГ) в надпродуктивных отложениях газоконденсатных месторождений п-ва Ямал // *Геология, геофизика разработка нефтяных и газовых месторождений*. № 11. 2005. С. 17-22.
 42. Дурмишьян А. Г. Значение аномально высоких пластовых давлений при поиске газовых и газоконденсатных залежей // *Газовая промышленность*. 1961. № 7. С. 1-3.
 43. Рокос С.И. Инженерно-геологические особенности приповерхностных зон аномально высокого пластового давления на шельфе Печорского и южной части Карского морей // *Инженерная геология*. 2008. № 4. С. 22-28.
 44. Anderson, A. L., Abegg, F., Hawkins, J. A., Duncan, M. E., and Lyons, A. P., 1998. Bubble populations and acoustic interaction with the gassy floor of Eckernforde Bay. " *Continental Shelf Research*, 18, 1807–38. doi:10.1016/S0278-4343(98)00059-4
 45. Токарев М.Ю., Полудеткина Е.Н., Старовойтов А.В., Пирогова А.С., Корост С.Р., Ошкин А.Н., Потемка А.К. Характеристика газонасыщенных отложений Кандалакшского залива Белого моря по данным сейсмоакустических и литолого-геохимических исследований // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2019. № 1. С. 107–114.
 46. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment / Cambridge University Press, New York 2007.
 47. Buldovich S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y ., Ospennikov E.N., Vorobyev S.A., Gunar A.Y ., Gorshkov E.I., Chuvilin E.M., Cherbunina M.Y ., Kotov P.I., Lubnina N.V., Motenko R.G., Amanzhurov R.M. Supplementary Materials for Cryovolcanism on the earth: Origin of a spectacular crater in the yamal peninsula (Russia) // *Scientific reports*. 2018. Vol. 8. • DOI: [10.1038/s41598-018-31858-9](https://doi.org/10.1038/s41598-018-31858-9)
 48. Титовский А.Л., Пушкарев В.А., Синицкий А.И., Барышников А.В. ЯМАЛЬСКИЕ КРАТЕРЫ: ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ФЕНОМЕНА // *НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК Ямало-Ненецкого автономного округа* 2018. № 3. Салехард. 2018. С.68-75.
 49. Богоявленский В.И. Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // *БУРЕНИЕ И НЕФТЬ*. 2015. № 6. С. 4-10.
 50. Mackay J. R. PINGO GROW TH AND COLLAPSE, TUKTOYAKTUK PENINSULA AREA, WESTERN ARCTIC COAST, CANADA: ALONG-TERM FIELD STUDY // *Géographie physique et Quaternaire*. 1998, vol. 52. P. 1- 53.
 51. Buldovich S., Khilimonyuk V., Bychkov A., Ospennikov E., et al. Cryogenic hypothesis of the Yamal crater origin Results of detailed studies and modeling // *Proc. 5th European Conference On Permafrost. Book of Abstracts*, 23 June - 1 July 2018a, Chamonix, France. P. 97-98.
 52. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного меторождения. / Отв. ред. Чувиллин Е. М. М.: ГЕОС, 2007.
 53. Щёлокова Д. В. НЕТРАДИЦИОННЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ КАК ИСТОЧНИК НЕИСЧЕРПАЕМОСТИ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов* 2016. №1. С. 120-126.

54. Ершов Э.Д., Чувилин Е. М., Налетов Н.С., Смирнова, О.Г. Поведение ионов химических элементов в промерзающих дисперсных породах // Тепломассообмен ММФ 96: Минск 1996. Т. 7. С. 16-20.
55. Chuvilin E., Ekimova V., Bukhanov B., Grebenkin S., et al. Role of Salt Migration in Destabilization of Intra Permafrost Hydrates in the Arctic Shelf: Experimental Modeling // *Geosciences*. 2019. V. 9(4). doi.org/10.3390/geosciences9040188/
56. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов. / М.: Высшая школа. 1973.
57. Арефьев С .П., Хомутов А.В., Ермохина К.А., Лейбман М.О. Дендрохронологическая реконструкция процесса формирования газового бугра на месте Ямальной воронки // *Криосфера Земли*. 2017. № 5. С. 107—119.
58. Kizyakov A., Leibman M., Zimin M., Sonyushkin A., Dvornikov Y., Khomutov A., Dhont D., Cauquil E, Pushkarev V., Stanilovskaya Y. Gas Emission Craters and Mound-Predecessors in the North of West Siberia, Similarities and Differences // *Remote Sens*. 2020, 12, 2182; 23 p. doi:10.3390/rs12142182
59. Chuvilin E., Stanilovskaya J., Titovsky A., Sinitsky A., Sokolova N., Bukhanov B., Spasennykh M., Cheremisin A., Grebenkin S., Davletshina D and Christian Badetz A Gas-Emission Crater in the Erkuta River Valley, Yamal Peninsula: Characteristics and Potential Formation Model // *Geosciences* 2020. 10 (170) 16 p. doi:10.3390/geosciences10050170
60. Данилов И.Д. Подземные льды. / М.: Недра, 1990.
61. Ершов Э.Д. Общая геокриология. / М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002.
62. Karpenko F. S., Kutergina V. N., Dernova E. O., and Osokina A. A. // *WATER RESOURCES* Vol. 49 Suppl. 2 2022 pp. 69-75
63. Ленченко Н.Н. Динамика подземных вод. / М. МГУ. 2004.
64. Гольдберг В. М., Скворцов Н. П. Проницаемость и фильтрация в глинах / М.: Недра, 1986.
65. Shiyun Lei, Xiujun Guo, Haoru Tang¹ Experiment and analysis of the formation, expansion and dissipation of gasbag in fine sediments based on pore water pressuresurvey // *Acta Oceanol. Sin.*, 2022, Vol. 41, No. 4, P. 91–100
66. Чувилин Е. М., Перлова Е. В., Якушев В. С. Классификация газового компонента пород криолитозоны // *Криосфера Земли*. 2005. №3. С. 73-76.
67. Сергеев и др. Грунтоведение. / М.: Изд-во МГУ. 1983.
68. Gassmann F. Elastic waves through a packing of spheres. *Geophysics.*, vol. 16, No. 4, 1954.
69. Gassmann F. Über die Elastizität Poröser Medien. *Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik*, No. 17, 1951, pp. 1—23.
70. Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы. Под редакцией Сергеева Е. М. / Недра, 1985.
71. Цытович Н. А. Механика грунтов Учебное пособие. / М.: Стройиздат, 1963.
72. Цытович Н. А. Механика грунтов (краткий курс): Учебник для строительных вузов. / М. : Высшая школа. 1983.
73. Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов./ М.: МАИК «Наука/Интерпериодика». 2002.
74. Роман Л. Т., Мерзляков В.П., Малеева А.Н. Влияние степени водогазонасыщения на температурные деформации мерзлых грунтов. // *Криосфера Земли*, 2017. № 3. С. 24–31.
75. Мирзаджанзаде А. Х., Хасанов М. М., Бахтизин Р. Н. Этюды о моделировании сложных систем нефтедобычи. / Уфа: ГИЛЕМ. 1999.

76. Мельников И.В., Нерсесов С.В., Осокин А.Б., Николайчук Э.В. и др. Геотехнические решения для строительства газовых скважин в особо сложных геокриологических условиях полуострова Ямал // Газовая промышленность. 2019. № 12. С 64-71.
77. СП 11-114-2004. «Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений» / Госстрой России М.: ФГУП ПНИИИС Госстроя России, 2004.
78. СП 11-102-97 «Инженерно-экологические изыскания для строительства»
79. Маштаков А.С. Анализ комплексного влияния геологических процессов и геодинамических воздействий на несущую способность свайных фундаментов нефтяных платформ, устанавливаемых на шельфе Каспийского моря // Инженерная геология. 2014. №2. С. 44 – 53.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, газонасыщенные мерзлые породы как объект изучения геокриологии.

Методология исследования, в статье не указаны, но исходя из анализа статьи можно сделать вывод о использовании методов анализа газового компонента в мерзлых породах, а также анализ литературных данных.

Актуальность затронутой темы безусловна и состоит в получении информации о неверном существующим представлении о незначительной роли грунтовых газов в формировании мерзлых пород и их свойств, что исключает из теории криолитогенеза значительный объём процессов, связанных с наличием газовой составляющей.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований сделать вывод об отсутствии комплексного изучения газонасыщенных межводных мерзлых пород. Это является важным направлением в развитии геокриологии.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим процесс образования льда в почве. Автором подробно рассмотрены биохимические процессы в осадках, поступление газа по различного рода тектоническим нарушениям в горных породах, влияние криогенного фактора на концентрацию внутригрунтового газа, особенностях распространения газонасыщенных пород в криолитозоне, особое внимание обращено на мерзлые породы в пределах нефтегазовых месторождений и содержащихся в них газов, формы нахождения газовых включений в талых и мерзлых грунтах, на изменение давления в мерзлых грунтовых массивах и его последствия. В лабораторных условиях рассмотрены процессы изучения перераспределения газа в грунтовом массиве, что делает представленные автором статьи результаты весьма интересными.

Однако есть ряд вопросов, в частности:

Автору статьи следовало бы выделить разделы статьи для лучшего восприятия кроме целевой установки указать методы исследования и задачи.

Автору необходимо было бы поработать над оформлением табличного материала, а не брать скриншоты, что позволило бы повысить наглядность и аргументированность представленных материалов.

Из приведённых автором направлений следует отметить особенно интересный кроме изучения особенностей строения, формирования и деформирования газонасыщенных

мёзлых грунтов. К ним относятся прежде всего разработка нормативных документов которые необходимы для проведения как пылевых, так и лабораторных исследований. Это направление позволит широко использовать полученные результаты уже в инженерно-технологических разработках, строительстве, прокладки дорог. Важнейшим моментом является и неучтённое автором направления влияние газов и их деформации на процессы изменения почвы на климатических условий.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты и технологические особенности использования грунтов..

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволившие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П. — Латеральная и радиальная дифференциация химического состава криогенных почв долины реки Вилюй, Центральная Якутия // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 1. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.1.40034 EDN: PNASYH URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=40034

Латеральная и радиальная дифференциация химического состава криогенных почв долины реки Вилюй, Центральная Якутия

Васильчук Юрий Кириллович

ORCID: 0000-0001-5847-5568

доктор геолого-минералогических наук

профессор, Московский государственный университет им. МВ. Ломоносова (МГУ), географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2009

✉ vasilch_geo@mail.ru

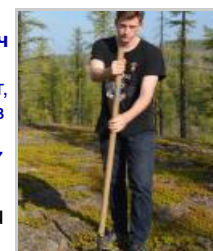


Гинзбург Александр Павлович

инженер, Московский государственный университет имени МВ. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв

119991, Россия, Ленинские горы область, г. Ленинские Горы, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2007

✉ alexandrginzburg13154@yandex.ru



[Статья из рубрики "Почвы холодных равнинных и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2023.1.40034

EDN:

PNASYH

Дата направления статьи в редакцию:

24-03-2023

Аннотация: Предметом исследования являются почвенно-геохимические особенности криогенных среднетаёжных ландшафтов долины реки Вилюй в её среднем течении, расположенных вблизи Махатта и посёлка Кысыл-Сыр Республики Саха (Якутия). Были составлены морфологические описания почвенных профилей. Выполнялись химико-аналитические лабораторные работы с целью установления значений физико-химических параметров почвенных горизонтов – pH, содержания легкорастворимых солей, содержания органического углерода, гранулометрического состава, фракционного состава железа. Главным аспектом почвенно-геохимических свойств

ландшафтов среднего течения Вилюя являлся валовой химический состав криогенных почв. Валовые содержания химических элементов были определены методом рентгеновской флуоресценции при помощи портативного РФА, после чего были рассчитаны геохимические коэффициенты радиальной (профильной) и латеральной (катенарной) дифференциации концентраций химических элементов – R и L. В автоморфных почвах большая часть химических элементов выносятся из поверхностных органогенных горизонтов, а в минеральных они концентрируются, причём среди всех элементов наибольшими значениями коэффициентов R отличаются такие элементы, как Ca, Ti, Mn, Fe, Zn и Zr (R достигают 20). На радиальную дифференциацию значительное влияние оказывают кислотность, содержание органического углерода и другие свойства почв, например, повышенное относительно горизонтов почвообразующих пород содержание Si, Ca, V и Zn (R до 1,3 – 3,7) связано с содержанием Сорг. В плане латеральной дифференциации большая часть из исследованных элементов характеризуется аккумуляцией в верхней части почвенно-геохимической катены. Наиболее широко распределены в почвах катены Ca, Mn, Fe, Zn и Y ($LCa = 0,3 - 1,8$; $LMn = 0,1 - 2,0$; $LFc = 0,6 - 2,1$; $LZn = 0,9 - 2,9$ и $LY = 0,3 - 1,4$).

Ключевые слова:

криогенные почвы, многолетнемерзлые породы, почвенно-геохимическая катена, концентрации макроэлементов, концентрации микроэлементов, латеральная дифференциация, радиальная дифференциация, средняя тайга, Центральная Якутия, река Вилуй

Работа выполнена в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова "Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды" и госбюджетной темы 1.4. «Антропогенная геохимическая трансформация компонентов ландшафтов», № ЦИТИС 121051400083-1.

Введение

Многолетнемерзлые породы в центральной якутской части криолитозоны являются одними из самых древних и мощных на планете: их возраст достигает нескольких сот тысяч, а может и 1-2 миллиона лет, а мощность варьирует в диапазоне от 500 до 1 500 м. [\[7,8,12\]](#) Современные климатические изменения способствуют динамике многолетнемерзлых пород [\[11,15,29\]](#), неравномерность которой в пространстве и времени создаёт многообразие криогенных ландшафтных обстановок в этом регионе. [\[19\]](#) Одним из последствий увеличения мощности сезонно-талого слоя (СТС) современных почв криолитозоны является вовлечение в малый биологический круговорот биологический круговорот (МБК) [\[25\]](#) химических веществ, ранее не задействованных в нём по причине многолетнемерзлого состояния содержащих их пород. Химические вещества, высвобождающиеся из мерзлых горизонтов почв, интересны для изучения не только по причине изменений биогеохимических циклов, но и с точки зрения собственно влияния криогенеза на химический состав и геохимические свойства криогенных почв. Район Центральной Якутии в среднем течении реки Вилуй является одним из уникальных по сочетанию развитых здесь криогенных процессов – морозобойного растрескивания, термосуффозии, термокарста, термоэрозии, солифлюкции, морозной сортировки, наледообразования и т.п. [\[12\]](#), поэтому данные о криогенном факторе формирования и

динамики геохимических свойств местных почв весьма интересны.

2. Объекты и методы

2.1. Физико-географические условия района исследования

Географическое положение

Район исследования расположен в долине реки Вилюй (Центральная Якутская равнина) в среднем её течении (63°54'10.92" с.ш., 122°33'17.87" в.д.; высота над уровнем моря около 100 м). В 10,5 км к востоку от него находится посёлок Кысыл-Сыр Вилюйского района. От г. Якутска район исследования удалён на 410 км к северо-востоку.

Краткая физико-географическая характеристика района исследования

Центральная Якутская равнина расположена в Вилюйской синеклизе – надпорядком элементе Сибирской платформы.^[31] Геологический фундамент территории образован осадочными отложениями мелового возраста (К 2 – верхнего отдела меловой системы), мощность которых здесь достигает 150–200 м.^[9] Берега Вилюя в его среднем течении сложены разновозрастным аллювием (от 39 до 12 тысяч лет). Низкие поймы – песчаным материалом с редкой горизонтальной слоистостью, высокие поймы и террасы чаще супесчаные с включениями галечников.^[33] На правом берегу Вилюя наблюдается комплекс из 5 надпойменных террас, имеющих резкие эрозионные уступы, левый берег насчитывает только до 3 таких террас, а ширина пойм на нём в 2–3 раза меньше, чем на правом.^[9] На обоих берегах довольно характерны крупные песчаные эоловые массивы с копьевидными закреплёнными и незакреплёнными дюнами – тукуланы.^[17] Многолетнемерзлые породы (ММП) в центральной Якутии распространены сплошно по вертикали и латерали, их вертикальная мощность достигает в среднем течении Вилюя 320 м.^[23,36] Средняя температура пород на границе слоя сезонных колебаний от -1 до -3°C, льдистость низкая – от 0,2 до 0,4%.^[24] Мощность сезонно-талого слоя (СТС) поверхностных отложений здесь весьма неравномерна и зависит в первую очередь от их состава: торфяники оттаивают всего на 0,5 м, тогда как супеси и суглинки – до 1,5 м, а СТС песков может превышать 4 м.^[2] Река Вилюй, левый и самый крупный приток реки Лены, имеет речной бассейн площадью 57,3 тыс. км², несколько крупных притоков (рр. Чона, Марха, Тюнг, Олёкма и др.) и гидрокарбонатно-кальциевый химический состав.^[4] Центральная Якутия характеризуется наличием таликов под руслами рек и котловинами озёр, известно о распространении субэкральных над- и межмерзлотных водоносных таликов на террасах крупных рек.^[18] Характерными особенностями подземных вод здесь являются их слабокислая реакция, малая минерализация (до 0,1 г/л), преимущественно гидрокарбонатный кальциево-магниевый/натриевый химический состав.^[26] Климат местности относится к резко-континентальному типу, средняя температура наиболее холодного месяца года – января, – составляет -37,8°C, наиболее тёплого – июля, – +17,9°C. Среднегодовая температура воздуха здесь держится около -9,3°C.^[20] Среднегодовое количество осадков в Центральной Якутии не превышает 250–300 мм.^[38] Из-за этого снежный покров здесь в целом невысокий, достигает максимальной мощности 25–30 см в марте, после чего стремительно стает к концу апреля.^[22] Территория по комплексу природно-ботанических признаков относится к Вилюйскому округу Центрально-Якутской среднетаёжной подпровинции подзоны среднетаёжных лесов.^[37] Растительный покров характеризуется преобладанием брусничных и

багульниковых зеленомошных лиственничных лесов с сосновыми лесами.^[10] В структуре древостоя значительно преобладает лиственница сибирская (*Larix siberica* L.) – 79,6%, также обширные площади занимает сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – 8,6%.^[5] На этой территории было выделено 9 зональных, 2 азональных и 7 интразональных типов почв, отмечается, что столь высокое разнообразие почвенного покрова является действие индивидуальных почвообразовательных макропроцессов на фоне криогенеза, типичного как для Центральной Якутии, так и в целом для криолитозоны.^[32] К зональным и наиболее распространённым здесь автоморфным почвам относятся палевые и подзолы мерзлотные. По ландшафтно-геохимическим характеристикам ландшафты верхней и средней частей бассейна Лены имеют следующую формулу:

$$I a Ca, Na - HCO_3 \frac{N, P, K, J \dots}{\dots}$$

где *I* – род ландшафта с медленным водообменом и преобладанием химической денудации над механической; *a* – вид ландшафта по глинистым и суглинистым аллювиальным отложениям (не лёссовидным); *Ca*, *Na* – *HCO₃* – типоморфные элементы в ландшафте (катионы и анионы); *N*, *P*, *K*, *J* ... – дефицитные элементы в ландшафте; избыточные элементы и соединения в ландшафте не отмечаются.^[21]

Более подробно литературные данные о физико-географических условиях территории изложены в работе.^[3]

2.2. Полевые методы исследований

Полевые работы были проведены на участке в долине реки Вилуй в июле 2021 г. В процессе исследований были заложены 12 разрезов почв в различных ландшафтных условиях от плоской поверхности второй надпойменной террасы Вилуя до днищ малых эрозионных форм и термосуффозионных воронок (рис. 1).



Рис. 1. Район исследования вблизи п. Кысыл-Сыр и восточной части тукулана Махатта. Заложенные почвенные разрезы отмечены красными точками

5 разрезов из 12 составили почвенно-геохимическую катену левобережья Вилюя (рис. 2). Разрезы почв закладывались при помощи лопат. В случае достижения верхней границы ММП образцы мёрзлых пород выбивались из толщи при помощи топора. Образцы сезонно-талых горизонтов почв отбирались при помощи ножей в пластиковые пакеты zip-lock. Общая масса каждого образца составляла 250–500 г. В полевых условиях горизонты почв описывались по схеме, предложенной для комплексного описания в Классификации и диагностике почв России^[14] и Полевом определителе почв^[30]. Полевые названия почв также были даны исходя из сочетаний диагностических генетических горизонтов и признаков, указанных в Полевом определителе почв^[30].

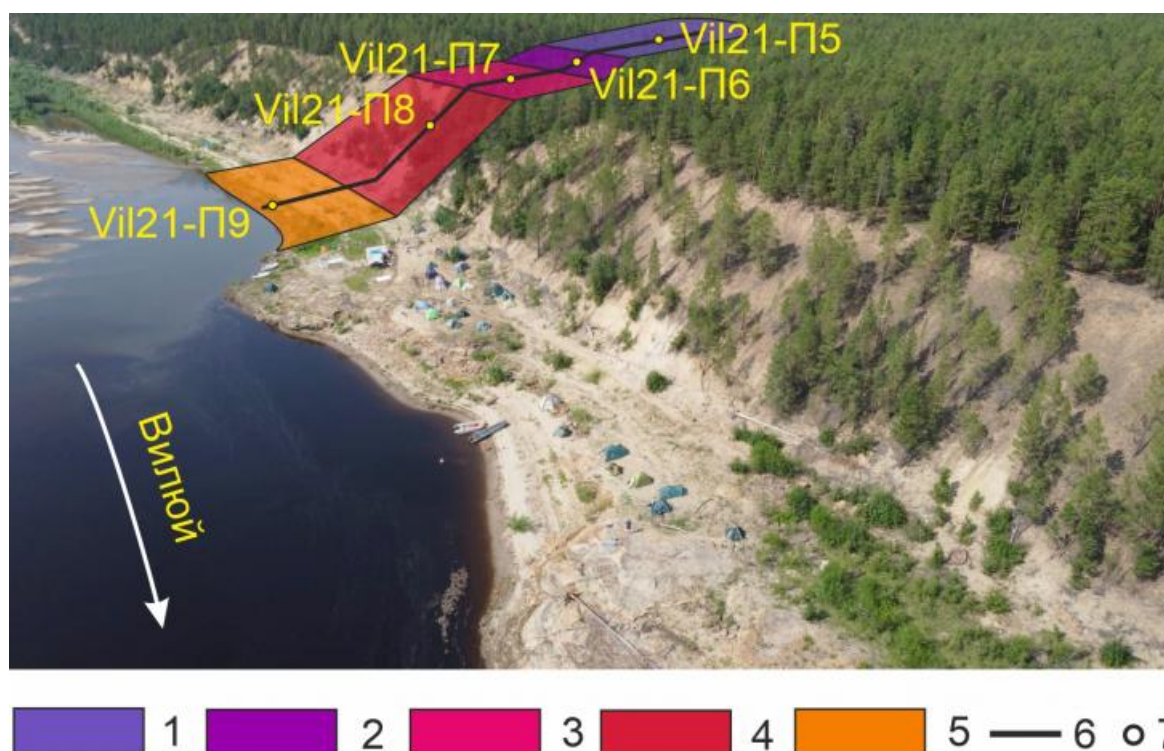


Рис. 2. Схематическое изображение почвенно-геохимической катены на левом берегу реки Вилюй: 1 – поверхность II надпойменной террасы; 2 – пологий склон II надпойменной террасы; 3 – поверхность I надпойменной террасы; 4 – крутой осыпной склон I надпойменной террасы; 5 – пойма Вилюя; 6 – линия заложения ландшафтного профиля; 7 – местоположения почвенных разрезов

2.3. Лабораторные методы исследований

В упакованном состоянии пробы были доставлены в химико-аналитическую лабораторию эколого-геохимического центра (ЭГЦ) географического факультета МГУ (г. Москва). Они были высушены при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния, после чего подвергались соответствующим процедурам пробоподготовки для дальнейшего лабораторного изучения химического состава и физико-химических свойств. В лабораторных условиях были проанализированы следующие аналитические показатели почв: кислотность водной вытяжки (рН), общее содержание легкорастворимых солей (TDS), общее содержание органического углерода (C_{org}), гранулометрический состав почв (с указанием класса в соответствии с систематикой Н.А. Качинского), концентрации несиликатного (Fe_{nc}) и аморфного (Fe_a) железа в почвах, а также валовое содержание макро- и микроэлементов.

Кислотность водных вытяжек

Для анализа кислотности почв проба была перетёрта фарфоровым пестиком в фарфоровой ступке, а затем просеяна сквозь сито с диаметром пор 1 мм. Кислотность была измерена ион-селективным электродом METTLER TOLEDO в суспензии, изготовленной в соотношении почвы к дистиллированной воде 1:2,5, а в случае анализа органогенных горизонтов соотношение уменьшалось до 1:25.

Общее содержание легкорастворимых солей

Пробоподготовка для выполнения анализа содержания легкорастворимых солей была аналогична описанной выше для исследования почвенной кислотности. Содержание водорастворимых солей в почвах было исследовано лабораторным кондуктометром METTLER TOLEDO в суспензии, изготовленной в соотношении почвы к дистиллированной воде 1:2,5.

Общее содержание органического углерода

Концентрации органического углерода в почвах были исследованы методом И.В. Тюрина с фотометрическим окончанием. Для этого образец почв перетирался фарфоровым пестиком в фарфоровой ступке, затем просеивался сквозь сито с диаметром пор 0,25 мм. Взвешенная на аналитических лабораторных весах навеска почвы массой 1 г заливалась 10 мл 0,4М бихромата калия ($K_2Cr_2O_7$) и помещалась в сушильный шкаф, разогретый до $+150^{\circ}C$, на 40 минут. Затем вытяжка остужалась при комнатной температуре и оттитровывалась 0,2М раствором Соли Мора ($FeSO_4 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$) в присутствии 5–6 капель фенилантраниловой кислоты ($C_{13}H_{11}NO_2$). Конечной точкой при данном виде окислительно-восстановительного титрования является смена окраски раствора с рыжевато-коричневой на тёмно-зелёную. Вычисление содержания органического углерода проводилось по формуле:

$$C_{орг}, \% = \frac{(V_1 - V_2) \times M \times 0,003 \times 100}{m}$$

где V_1 – объём раствора соли Мора, пошедший на титрование холостой пробы (пробы без навески) почвы (cm^3); V_2 – объём раствора соли Мора, пошедший на титрование пробы с навеской почвы (cm^3); M – молярность раствора соли Мора; 0,003 – молярная масса $\frac{1}{4} C$ (г/моль); 100 – коэффициент перевода на 100 г почвы; m – масса сухой навески почвы.

Гранулометрический состав

Образец почвы для гранулометрического анализа перетирался резиновым пестиком в фарфоровой ступке и просеян сквозь сито с диаметром пор 1 мм. Гранулометрический состав почв был исследован методом лазерной гранулометрии после перетирания навески в фарфоровой чашке резиновым пестиком с раствором пирофосфата натрия ($Na_4P_2O_7$). Пирофосфат применяется для устранения слипания частиц почвы. Анализ гранулометрического состава почв был измерен на лазерном гранулометре Fritsch Analysette-22 (Германия). Для классифицирования почв по содержанию фракции физической глины в них использовалась шкала Н.А. Качинского (табл. 1).

Таблица 1. Классификация почв по содержанию фракции физической глины (Н.А. Качинского)

Класс гранулометрического	Содержание физической глины,
------------------------------	---------------------------------

состава	%
<i>Песчаные</i>	
Рыхло-песчаный	0 – 5
Связно-песчаный	5 – 10
Супесчаный	10 – 20
<i>Суглинистые</i>	
Легкосуглинистый	20 – 30
Среднесуглинистый	30 – 40
Тяжелосуглинистый	40 – 50
<i>Глинистые</i>	
Легкоглинистый	50 – 65
Среднеглинистый	65 – 80
Тяжелоглинистый	>80

Концентрации несиликатного и аморфного железа

Определение несиликатных соединений железа (Fe_{nc}) выполнялось по методу Мера-Джексона. Навеску воздушно-сухой почвы, просеянной через сито с диаметром отверстий 1 мм, массой 2 г помещали в центрифужную пробирку вместимостью 50 см³. В пробирку приливали 20 мл 0,3М раствора цитратанатрия ($Na_3C_6H_5O_7$) и 2,5 мл 1М раствора гидрокарбоната натрия ($NaHCO_3$), затем в пробирку вносили 0,5 г сухого порошка дитионита натрия ($Na_2S_2O_4$) и перемешивали стеклянной палочкой. После этого в пробирку добавляли 5 мл насыщенного раствора хлорида натрия ($NaCl$), перемешивали и оставляли в водяной бане до образования хлопьевидного осадка. Затем проводили центрифугирование в течение 10 мин при 3000 оборотах в минуту, центрифугат сливали через сухой плотный фильтр в мерную колбу вместимостью 250 мл. Концентрация железа в полученном растворе определялась методом спектрофотометрии.

Экстракция аморфных соединений железа (Fe_a) из почв была выполнена методом Ф. Тамма, основанном на экстракции окристаллизованного железа с помощью буферного раствора Тамма (0,14М по $H_2C_2O_4$ и 0,2М по $(NH_4)_2C_2O_4$). Залитая буферным раствором навеска почвы массой 1 г профильтровывалась сквозь складчатый бумажный фильтр «синяя лента» с диаметром пор 0,45 мкм. Процедура фильтрования повторялась 3 раза, после чего раствор был разбавлен дистиллированной водой в мерной колбе объемом 250 мл и разлит по пластиковым пробиркам. Анализ концентраций аморфных форм железа был проведен методом спектрофотометрии.

Валовые содержания макро- и микроэлементов

Концентрации макро- и микроэлементов были измерены в перетёртых в агатовой ступке и просеянных сквозь сито с диаметром пор 0,25 мм образцах почв методом рентген-флуоресцентного анализа (РФА). Для этого был использован портативный горно-геологический рентген-флуоресцентный анализатор Olympus Delta Professional (США). Этот прибор способен определять валовые концентрации 35 химических элементов с атомными массами от Mg до U.

2.4. Геохимические ландшафты и коэффициенты

Описания и характеристики геохимических особенностей ландшафта даны в соответствии с работой А.И. Перельмана и Н.С. Касимова [28]. Для характеристики элементарных геохимических ландшафтов им были даны названия в соответствии с классификацией

М.Д. Богдановой с соавторами^[11]. В качестве основного критерия выделения элементарных ландшафтов здесь используются формы (и элементы) рельефа.

Для характеристики пространственной неоднородности химического состава почв были использованы геохимические коэффициенты радиальной и латеральной дифференциации.^[27,28] Коэффициент радиальной дифференциации (R) используется для изучения профильной (вертикальной) неоднородности химического состава путём сравнения концентраций конкретных веществ в почвенных горизонтах с таковыми в горизонте почвообразующей породы:

$$R_x = R_{x(\text{гор.})} / R_{x(\text{пор.})}$$

где $R_{x(\text{гор.})}$ – концентрация химического вещества x в почвенном горизонте; $R_{x(\text{пор.})}$ – концентрация химического вещества x в почвообразующей породе.

Коэффициент латеральной дифференциации (L) используется для изучения катенарной (субгоризонтальной) неоднородности химического состава ландшафта. В данном случае сравнение ведётся между концентрацией химического вещества x в почвах подчинённых и автономных (элювиальных) элементарных геохимических ландшафтов. Этот показатель призван охарактеризовать латеральную миграцию химических веществ в почвах, связанных едиными потоками влаги, перемещающейся по рельефу сверху вниз под действием силы тяжести. В качестве модельной области при использовании L выступает почвенно-геохимическая катена:

$$L_x = L_{x(\text{подч.})} / L_{x(\text{авт.})}$$

где $L_{x(\text{подч.})}$ – концентрация химического вещества x в подчинённом элементарном геохимическом ландшафте; $L_{x(\text{авт.})}$ – концентрация химического вещества x в автономном (элювиальном) элементарном геохимическом ландшафте.

При анализе катенарной неоднородности химического состава почв в долине Вилюя параллельно приводятся данные о коэффициентах L сезонно-талых и многолетнемёрзлых горизонтов почв.

3. Результаты

3.1. Классификация, диагностика и свойства почв

Изученные почвы, согласно принятым в классификации и диагностике почв России^[14] таксономическим уровням, относятся к стволам син- (аллювиальная серогумусовая) и постлитогенного почвообразования (остальные почвы). Скорости аккумуляции речных наносов в аллювиальных почвах сопоставимы с темпами почвообразования, что приводит к циклическому характеру почвообразования в них. Почвы постлитогенного ствола относятся к следующим типам: дерново-подзолы и дерново-подбуры (почвы, развивающиеся на возвышенных участках рельефа – надпойменных террасах и их склонах), торфяно-глеозёмы (во влажных днищах малых эрозионных форм рельефа – оврагов и балок), серогумусовые, в том числе, погребённые под золовыми наносами на тукуланах, а также стратозёмы на речных поймах и псаммозёмы – на заболоченных и обводнённых участках внутри термосуффозионных воронок. Более подробно результаты классификации и диагностики почв, а также описания морфологии почвенных профилей изложены в нашей работе.^[3]

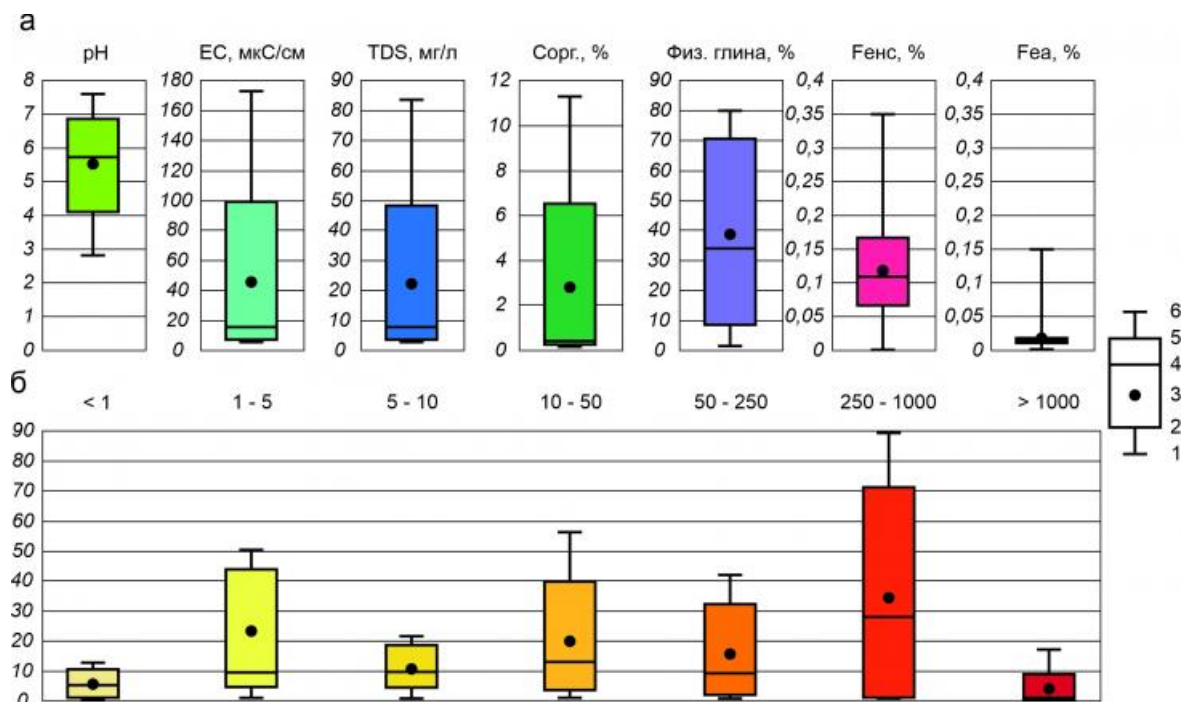


Рис. 3. Диаграммы «ящик с усами», демонстрирующие статистические показатели свойств почв (а) и содержания гранулометрических фракций (б): 1 – минимальные значения; 2 – квартиль 25%; 3 – средние арифметические; 4 – квартиль 50%; 5 – квартиль 75%; 6 – максимальные значения

Кислотность почв варьирует в изученных профилях от 2,8 до 7,6 единиц, что соответствует грациям от сильнокислых до близких к нейтральным. В основном, кислотность регулируется содержанием органического вещества, как источника легкоразлагаемых органических веществ, являющихся источником свободных ионов водорода при деструкции. Более кислыми реакциями отличаются поверхностные органогенные (Т, О и АУ) горизонты, а также погребённые торфяные горизонты ([О] и др.). Притом, если pH серогумусовых горизонтов АУ незначительно отличаются от нижележащих горизонтов преимущественно минерального фазового состава (Е, ВF и т.п.) – примерно на 0,5–1,0 единиц, то торфяные горизонты являются самыми кислыми (pH понижается до 2,8). В целом, для почв характерен элювиально-иллювиальный тип профильного распределения. Среднее значение pH равно 5,7, а разброс стандартных отклонений составляет $\pm 0,9$ с коэффициентом вариации 0,2 (табл. 2, 3).

Таблица 2. Физико-химические свойства почв долины реки Вилюй

Почва	Горизонт	Глубина, см	pH	ЕС, мкС/см	TDS, мг/л	C _{орг} , %	Содержание железа, %		
							Fe _{вал.}	Fe _{ис.}	Fe ₂
Аллювиальная-серогумусовая	AY	0–13	7,6	26,2	13,1	2,0	1,3	0,20	0,01
	C~	13–25	7,5	24,9	12,9	0,3	1,7	0,16	0,00
	[AY]	25–43	7,4	31,4	15,7	1,0	3,2	0,18	0,01
	[C~]	43–55	7,3	21,7	10,7	2,8	2,0	0,14	0,00
Дерново-подзол иллювиально-железистый псевдофибровый	O	0–2	6,3	23,6	11,9	1,7	4,3	0,16	0,02
	AY	2–9	6,5	18,8	9,5	0,7	1,4	0,17	0,02
	E	9–7(22)	4,8	7,1	3,5	0,3	0,8	0,08	0,01
	Bfff	17(22)–36	4,3	7,2	3,8	0,4	0,8	0,11	0,02
Торфяно-глеезём мелкоторфянистый поверхностно-оглееный	BC	36–55	3,5	9,0	4,4	0,3	1,9	0,15	0,01
	T	0–10	2,8	173,1	83,7	7,3	2,6	0,17	0,03
	CG~	10–20	5,7	16,8	8,2	2,7	1,8	0,20	0,02
	H	20–22	4,8	60,6	28,2	11,3	2,1	0,29	0,10
Погребенная серогумусовая криотурбируемая мощная песчаная	[AY]	40–80	5,7	8,3	4,2	0,3	1,9	0,03	0,02
	[C@]	60	5,9	5,9	2,9	0,2	2,9	0,04	0,02
Дерново-подзол иллювиально-железистый языковатый псевдофибровый маломощный песчаный	AY	0–6(8)	5,6	18,4	9,1	1,3	0,3	0,08	0,01
	AYe	6(8)–11(20)	5,4	8,7	4,4	0,5	2,3	0,10	0,00
	E	11(20)–22(30)	5,4	8,0	4,0	0,4	1,0	0,13	0,02
	Ey	22(30)–51	5,3	6,3	3,6	0,4	1,1	0,08	0,01
Дерново-подзол иллювиально-железистый псевдофибровый среднемощный песчаный	Bfff	5–115	5,4	5,3	2,6	0,2	1,5	0,06	0,00
	O	0–2 (3)	5,9	26,3	13,0	5,5	1,9	0,09	0,00
	AY	2(3)–11(13)	6,0	17,3	8,6	0,5	1,1	0,04	0,02
	Ef	11(13)–30	5,4	11,4	5,7	0,3	4,3	0,00	0,00
Дерново-подбур иллювиально-железистый оподзоленный среднемощный песчаный	Bfff	30–55	5,7	11,7	5,9	0,3	2,3	0,02	0,00
	BF	55–100	5,1	10,9	5,5	0,2	1,0	0,09	0,02
	O	0–1	5,8	58,2	28,7	1,7	1,1	0,27	0,02
	BFe	12(14)–45	6,2	10,4	5,3	0,4	1,4	0,15	0,02
Серогумусовая ожелезнённая со слаборазвитым профилем	C	45–98	5,9	17,7	8,8	0,2	0,3	0,06	0,00
	C'	98–120	6,7	16,8	8,5	0,2	2,1	0,07	0,00
	C	105–110	5,6	13,9	6,9	0,2	1,7	0,06	0,00
	Cf	15(18)–25(30)	5,8	20,8	10,3	0,4	0,8	0,08	0,01
Стратозём серогумусовый водно-аккумулятивный	Cf'	25(30)–38	5,6	13,9	7,1	0,2	1,2	0,14	0,01
	RYaq	0–37	6,8	140,3	70,3	2,6	1,3	0,26	0,09
	C~	37–42	6,5	41,8	21,1	0,5	0,5	0,13	0,02
	[W]	42–48	6,7	147,7	73,7	3,4	0,3	0,35	0,10

Продолжение таблицы 2

Псаммозём водно-аккумуля- тивный страти- фицированный песчаный	Cr1-aq, rz	2(4)–15	5,8	8,6	4,3	4,1	1,5	0,08	0,01
	[O]	15–18	5,1	107,9	54,5	2,2	2,3	0,19	0,04
	[T]	21–32	5,0	61,1	30,5	8,3	1,4	0,21	0,15
	[O]'	41–46	5,9	25,0	12,4	0,3	0,8	0,05	0,02
Псаммозём глееватый поверхностно- оглеенный песчаный	C	1–15	5,9	7,7	3,9	0,4	2,7	0,02	0,000
	Cg	15–30	6,1	12,8	6,4	0,5	0,8	0,02	0,01
Псаммозем глееватый мерзлотный	W	0–2	5,8	8,4	4,3	0,4	1,8	0,11	0,01
	Cg	2–17	5,7	11,8	5,9	0,2	1,2	0,16	0,01
	Cg ¹	17–28	5,3	9,5	4,8	0,3	1,2	0,19	0,02

Таблица 3. Гранулометрический состав почв долины реки Вилюй

Почва	Гори- зонт	Глубина, см	Содержание гранулометрических фракций диаметром (мкм), %							Физ. глина (< 10)
			< 1	1–5	5–10	10– 50	50– 250	250– 1000	> 1000	
Аллювиальная- серогумусовая	AY	0–13	7,5	43,5	18	23,7	7,3	0	0	69
	C [~]	13–25	10	46,6	20	13,4	9,4	0,6	0	76,6
	[AY]	25–43	7,6	37,9	15,6	21,3	17,6	0	0	61,1
	[C [~]]	43–55	4,2	17,3	7,5	6,1	32,6	32,3	0	29
Дерново-подзол иллювиально- железистый псевдофиб- ровый	O	0–2	1,8	8,3	5,4	16,7	32,6	35,2	0	15,5
	AY	2–9	6,8	27,9	13,9	42,8	8,6	0	0	48,6
	E	9–17(22)	9,6	36,8	16,2	21	14,5	1,9	0	62,6
	Bff	17(22)– 36	6,3	19,9	6,1	3,5	2,3	61,8	0,1	32,3
	BC	36–55	1,6	5,9	1,7	2,5	3,4	83,7	1,2	9,2
Торфяно- глеезём мелкоторфяни- стый поверхно- стно-оглеенный	T	0–10	1,1	6,3	4,2	16,6	40,3	31,3	0,2	11,6
	CG [~]	10–20	4,6	21,4	14,2	37,6	22,2	0	0	40,2
	H ¹	20–22	0,9	5,3	4,9	45	40,2	3,7	0	11,1
Погребенная серогумусовая криотурбиро- ванная мощная песчаная	[AY]	40–80	10,3	38,9	13,5	7,1	1,8	28,4	0	62,7
	[C@]	60	11,6	39,1	12,5	6,6	2,9	27,3	0	63,2
Дерново-подзол иллювиально- железистый языковатый псевдофибро- вый маломощ- ный песчаный	AY	0–6(8)	3,4	13,9	8,3	12,1	12,6	49,7	0	25,6
	AYe	6(8)– 11(20)	5,2	19,5	8,9	7	3,1	56,3	0	33,6
	E	11(20)– 22(30)	11,1	39,6	16,4	26	5,1	1,8	0	67,1
	Ey	22(30)– 51	7,5	28	8,7	4,9	1,2	49,6	0,1	44,2
	Bff	51–115	2,9	12,4	4,2	2,2	1,5	74,4	2,4	19,5
Дерново-подзол иллювиально- железистый псевдофибро- вый среднемо- щный песчаный	O	0–2 (3)	1,5	7,9	6	26,3	27,6	30,7	0	15,4
	AY	2(3)– 11(13)	9,8	41,4	21,4	17,8	2,3	7,3	0	72,6
	Ef	11(13)– 30	0,5	1,5	0,6	1,3	3,4	89,2	3,5	2,6
	Bff	30–55	4,3	16	5,6	3,2	2,8	67,9	0,2	25,9
	BF	55–100	11,2	45,1	17,7	13,7	7,2	5,1	0	74

Продолжение таблицы 3

Дерново-подбур иллювиально- железистый оподзоленный среднемощный песчаный	O	0–1	1,7	8,1	5,1	22,9	38,8	23,4	0	14,9
	BFe	12(14)– 45	10,5	40,1	17,2	21,3	10,3	0,6	0	67,8
	C	45–98	12,5	50,1	17,4	10,6	1,8	7,6	0	80
	C'	98–120	8,6	31	11,2	6,8	0,6	41,8	0	50,8
Серогумусовая ожезнённая среднемощная песчаная со слабо развитым профилем	C	105–110	7,1	26,2	11,7	8,2	0	46,8	0	45
	AY	0–15(18)	1	4,2	1,6	3,3	11,8	75,3	2,8	6,8
	Cf	15(18)– 25(30)	5,8	16,2	6,1	3,8	0	51,2	16,9	28,1
	Cf'	25(30)– 38	2,9	10,4	3,6	2,9	6,6	70,8	2,8	16,9
Стратозём серо- гумусовый водно- аккумулятивный	RYaq	0–37	4,6	23,2	14	55,4	2,8	0	0	41,8
	C [~]	37–42	6,4	29,7	16,7	29	18,2	0	0	52,8
	[W]	42–48	3,7	18,2	12,5	55,9	9,7	0	0	34,4
Псаммозём водно- аккумулятивный стратифициро- ванный песчаный	Cr1-aq, gz	2(4)–15	1,1	6,7	5,5	32,6	33,2	20,9	0	13,3
	[O]	15–18	10,2	42,2	18,6	12,2	15,5	1,3	0	71
	[T]	21–32	1,9	12,8	11,3	44,1	29,9	0	0	26
	[O]'	41–46	0,5	2	1	2	23,1	71,4	0	3,5
Псаммозём глееватый поверхностно- оглееный песчаный	C	1–15	0,2	0,8	0,5	1	5,3	89,2	3	1,5
	Cg	15–30	0,3	1,7	1,3	7,6	18,8	63,9	6,4	3,3
Псаммозем глееватый мерзлотный	W	0–2	7,5	28,9	10,3	9,2	6,8	37,2	0,1	46,7
	Cg	2–17	7,5	34,6	15	18,1	24,8	0	0	57,1
	Cg ¹	17–28	4,9	19,3	6,6	14	41,6	13,6	0	30,8

Общее содержание легкорастворимых солей и связанная с ним электропроводность распределены в почвах относительно равномерно, притом содержание солей мало, оно редко превышает 10,0 мг/л, соответственно, ЕС нечасто принимает значения выше 20,0 мкС/см. Среднее содержание солей в почвах составляет $14,7 \pm 19,3$ мг/л, а коэффициент вариации равен 1,3. Органогенные горизонты, как правило, незначительно обогащены водорастворимыми солями (на 3–5 мг/л), однако встречаются также весьма высокие значения (до 83,7 мг/л), приуроченные к торфяным и погребённым грубогумусовым горизонтам (табл. 2). В профилях значения ЕС и TDS распределены с максимумами в верхней части и с монотонными распределениями в нижних.

Очевидно, что поверхностные горизонты почв содержат наибольшие (до 11,3%) концентрации $C_{орг}$. В глубоких горизонтах почв, незначительно затронутых почвообразовательными процессами, содержания $C_{орг}$ снижаются и далее распределяются равномерно (концентрации около 0,3–1,0%), за теми лишь исключениями, что в погребённых органических горизонтах (от 1,0 до 11,3%) эти значения сильно вырастают. При средней концентрации органического углерода равной 1,5% стандартные отклонения равны $\pm 2,4\%$, а коэффициент вариации составляет 1,6 (табл. 2).

Среди рассмотренных фракций железа несиликатная фракция сосредоточена в изученных почвах в концентрациях, в 11 раз больших, чем аморфная фракция. Диапазон концентраций фракции $Fe_{нс}$ составляет 0,35%, что примерно в 2,5 раза выше, по сравнению с диапазоном концентраций Fe_a . Предположительно, доля аморфной фракции железа в составе несиликатной группы соединений столь низка из-за небольшой глубины почвообразования, в результате чего содержание органического углерода низко (особенно в минеральной части почвенных профилей).

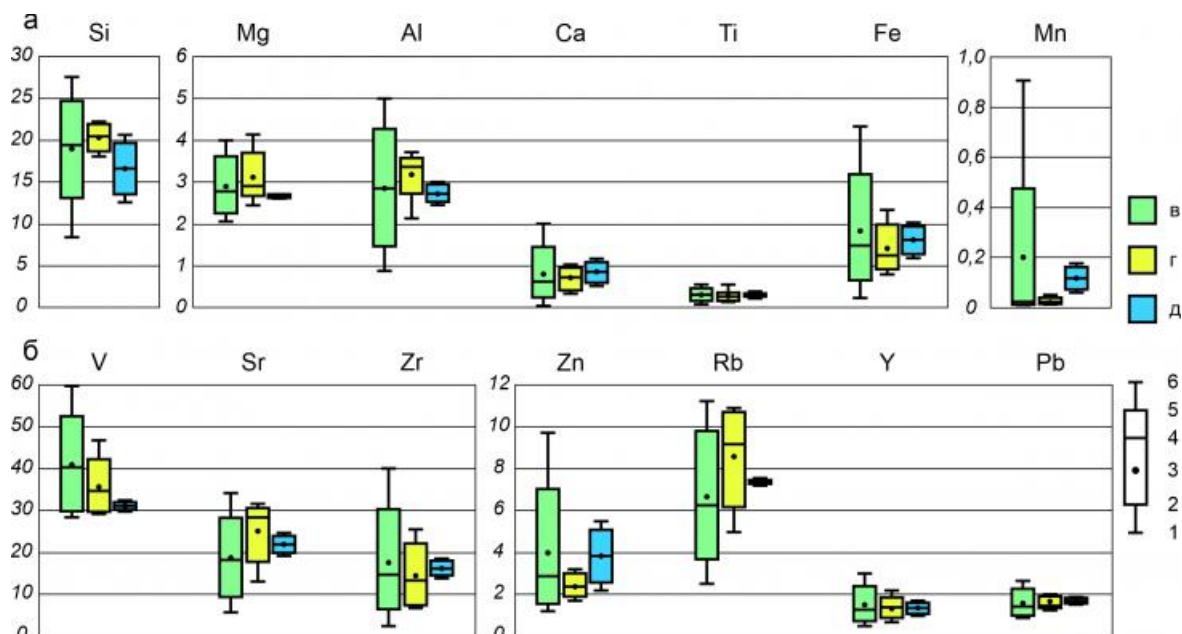


Рис. 4. Диаграммы «ящик с усами», демонстрирующие статистические показатели макро- (г/кг) (а) и микроэлементного (мг/кг) (б) состава сезонно-талых (в), сезонно-талых криогенных (г) и многолетнемёрзлых горизонтов почв (д): 1 – минимальные значения; 2 – квартиль 25%; 3 – средние арифметические; 4 – квартиль 50%; 5 – квартиль 75%; 6 – максимальные значения

Практически во всех случаях из рассмотренных содержания всех изучаемых химических элементов варьируют в более широких пределах, чем их же содержания в криогенных и многолетнемёрзлых горизонтах (рис. 4). Связано это, скорее всего, с повышенными содержаниями элементов в поверхностных органогенных горизонтах почв, что характерно особенно для элементов с повышенной склонностью к ассоциированию с органическим веществом и сорбции на коллоидах органической природы – Ca (до 1,3 г/кг), Mn (до 0,14 г/кг), Fe (до 4,3 г/кг) и др. Именно с этими пиками связаны повышенные максимальные значения концентраций этих металлов, отражённые на рис. 4, и с ними же связано то, что границы квартилей содержания Fe, Mn, V, Zr и Zn смещены к нижней границы амплитуды концентраций.

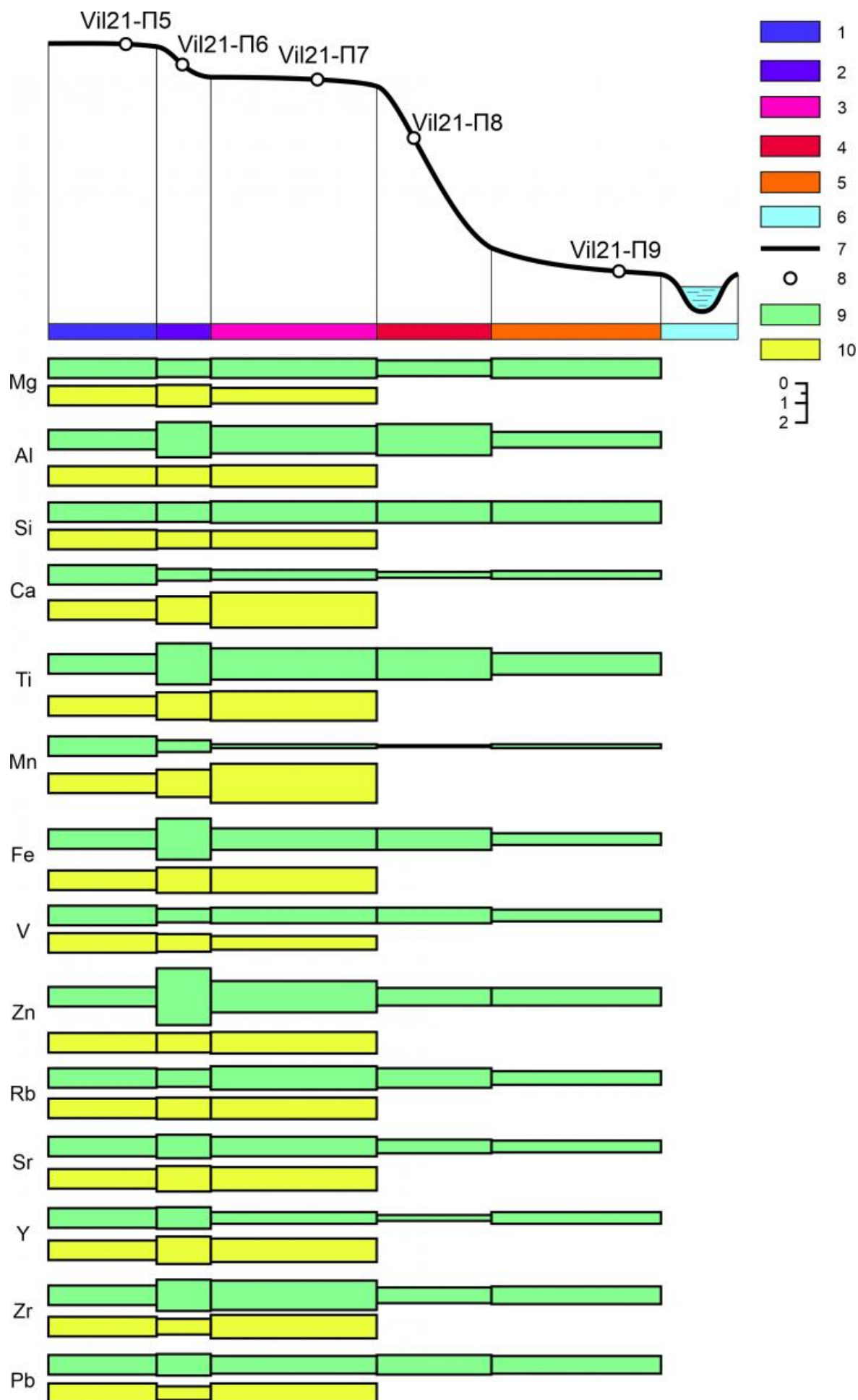
Многие средние содержания элементов в криогенных горизонтах сезонно-талого слоя почв меньше, по сравнению с сезонно-талыми горизонтами (см. рис. 4). Исключение составляют лишь средние концентрации Si, Al, Sr и Rb, которые, по-видимому, преимущественно входят в состав первичных, устойчивых к выветриванию минералов. Низкие (Ca – 0,7 г/кг в среднем, Ti – 0,2 г/кг в среднем, Mn – 0,03 г/кг в среднем, Y – 1,4 мг/кг, Pb – 1,7 мг/кг в среднем) содержания этих элементов в минеральных горизонтах, связаны в первую очередь с разрушением минеральных зёрен при промерзании почв в зимний период. Криогенная деструкция минералов отмечалась ранее в различных районах криолитозоны. [\[16,34,35\]](#) После разрушения криогенными процессами многие из этих элементов, входящие в состав частиц почвы, перемещаются вниз по профилю с водными потоками, после чего аккумулируются в надмерзлотном и многолетнемёрзлом горизонтах (Ca – 0,9 г/кг, Ti – 0,3 г/кг, Fe – 1,6 г/кг, Mn – 0,1 г/кг (рис. 4а), Zr – 16,2 мг/кг, Zn – 3,9 мг/кг (см. рис. 4,б) в среднем).

Наиболее широко в многолетнемёрзлых горизонтах почв варьируют Si и Zn (18,2 – 22,3 г/кг и 1,7 – 3,2 мг/кг). Остальные же элементы распределены в многолетнемёрзлых горизонтах в значительно более узких пределах. Накоплению элементов в горизонте многолетнемёрзлых пород способствуют как термодинамические (мёрзлое состояние

горизонта) свойства, так и возникающая в связи с ними восстановительная обстановка.^[13] Таким образом, мерзлота выполняет биосферную функцию радиального геохимического барьера,^[28] на котором осаждаются Al, Si, Ca, Mn, Fe.

3.2. Почвенные профили и радиальная дифференциация химического состава почв

Различные свойства почв создают разнообразие профильных распределений значений коэффициента R . Большая часть изученных элементов распределена в профилях (рис. 5) автоморфных почв (см. рис. 5,г и 5,д) распределена с накоплением в минеральных горизонтах, а из поверхностного органогенного горизонта дерново-подзола иллювиально-железистого языковатого они активно выносятся (значения R варьируют в пределах от 0,1 до 0,8), кроме Si, повышенное значение R которого (см. рис. 5, д) связано, скорее всего, с невысокой мощностью самого горизонта АУ и перемешанностью его с нижележащим песком. Наиболее сильно в профилях почв накоплены такие элементы, как Ca, Ti, Mn, Fe, Zn, Zr, значения R которых достигают 20,0 (см. рис. 5,л). Промывной тип водного режима почв песчаного и супесчаного гранулометрического состава обеспечивает активную радиальную водную миграцию веществ в профилях большей части изученных разрезов. Этим объясняется пониженное содержание элементов в горизонтах Е (а также с признаком е) и С, в особенности это проявляется в горизонте С дерново-подбуря (см. рис. 5,ж), в котором рассеяны (R варьирует от 0,1 до 0,9) практически все рассмотренные элементы, за исключением Si, высокое содержание которого также связано с песком в гранулометрическом составе, который имеет кремнезём (SiO_2) в своей основе. Остальные элементы, в особенности Mg, Ti, Fe, V и Pb, накапливаются в надмерзлотном тёмноцветном горизонте С' ($R = 1,1-1,5$). Псевдофибровые горизонты альфегумусовых почв часто отличаются аналогичных по морфологии и физико-химическим свойствам более высокими содержаниями химических элементов, по сравнению с непсевдофибровыми. Так была отмечена предполагаемая роль железосодержащих частиц в транслокации ионных форм других металлов. Повышенное содержание как валового, так и аморфного железа, фаза которого отличается способностью к ассоциации с микроэлементами ($RTi = 1,0-1,8$; $RMg = 1,0 - 1,4$; $RMn = 1,0-33,0$ и др.). Ca среди всех прочих химических элементов демонстрирует одну из самых устойчивых тенденций к поверхностно-аккумулятивному типу распределения. По-видимому, концентрации Ca находятся в прямой корреляционной зависимости от глубины почвообразования. RCa в горизонтах W, O и АУ равны 0,5 – 10,0. Суглинистый гранулометрический состав, проявляющийся, к примеру, в водно-аккумулятивном горизонте RYaq, способствует накоплению всех из изученных элементов, кроме Si, Ca, V и Zn. Высокое содержание органических веществ (Сорг. = 2,57%) и повышенная электропроводность (ЕС = 140 мкС/см) в совокупности с утяжелённым гранулометрическим составом приводят к тому, что R здесь равен 1,3–3,7 (см. рис. 5,и). Многолетнемёрзлые горизонты почв характеризуются повышенными концентрациями практически всех элементов, в особенности макроэлементов, в сравнении с надмерзлотными (см. рис. 5,в и 5,м). При этом, скорее всего, степень развитости органогенного горизонта и его разложения влияет на интенсивность сорбции металлов и металлоидов органическим веществом. Так, грубогумусовый горизонт W в псаммозёме глееватом мерзлотном пропускает большую часть поступающих в него элементов ($R = 0,5-1,0$), а сильноразложенный T в торфяно-глеезёме мелкоторфянистом аккумулирует большую часть поступающих химических веществ, в особенности Si, V и Zr ($R = 1,5, 1,7$ и 2,0).

Рис. 6. Значения коэффициента латеральной дифференциации (L) в элементарных

геохимических ландшафтах катены в долине реки Вилюй: 1 – элювиальный первого порядка ГХЛ; 2 – трансэлювиальный со слабым выносом ГХЛ; 3 – элювиальный второго порядка ГХЛ; 4 – трансэлювиальный с активным выносом ГХЛ; 5 – супераквальный транзитный ГХЛ; 6 – аквальный ландшафт реки Вилюй; 7 – профиль рельефа; 8 – местоположения заложенных почвенных разрезов; 9 – сезонно-талые горизонты почв; 10 – криогенные горизонты почв

В изученных почвах пределы варьирования коэффициентов латеральной дифференциации химических элементов весьма широки. Наиболее широко распределены в почвах катены Ca ($LCa = 0,3 - 1,8$; $LMn = 0,1 - 2,0$; $LFe = 0,6 - 2,1$; $LZn = 0,9 - 2,9$ и $LY = 0,3 - 1,4$). Многие элементы из изученных, такие как Al, Ti, Fe, Zn и Zr, аккумулируются в криогенных элювиальных ожелезнённых и псевдофибровых горизонтах подзолов на пологом склоне первой надпойменной террасы, что также может быть связано с повышенным содержанием железа и его аморфных форм (см. табл. 2). Повышенное содержание железа и алюминия в этих горизонтах также объясняется как высокими (относительно среднепрофильных) содержаниями крупных гранулометрических фракций диаметрами 250–1000 мкм до 89,2%, поскольку слабозрушенные в процессе криогенеза первичные минералы, содержащие Al и Fe в своих кристаллических решётках, содержатся здесь в высоком количестве. Накопление же микроэлементов – Zn, Y и др. – в них объясняется, скорее всего, наличием сорбционного латерального геохимического барьера, поскольку в горизонте BFff содержится до 26% фракции физической глины, обладающей повышенной сорбционной способностью. Для большей части химических элементов в рассмотренной почвенно-геохимической катене характерно концентрирование в верхней части в результате преобладания там радиальной миграции веществ, а также степени развития гумусового горизонта, выступающего на пути миграции в качестве радиального сорбционно-биогеохимического барьера. В дерново-подбурах на первой надпойменной террасе Вилюя, особенно в криогенных горизонтах, сосредоточено большое количество Ca, Mn и Ti – $LCa = 1,8$, $LTi = 1,5$ и $LMn = 2,0$, соответственно. Это также связано с высокими концентрациями несиликатного и аморфного Fe наряду довольно высокими (до 50,8%) содержаниями физической глины. Ниже по склону катены горизонты с признаками криогенеза не распространены в связи с почти полным отсутствием экранирующей поверхности растительного покрова (на склоне первой террасы Вилюя) и утепляющим влиянием речной воды (в супераквальном ГХЛ поймы). В серогумусовой почве на склоне террасы многие элементы рассеяны (см. рис. 6), например, $LMg = 0,8$, $LCa = 0,3$, $LMn = 0,1$ и т.д. Особенно слабо в горизонтах этой почвы концентрирован Mn. По-видимому, весьма лёгкий гранулометрический состав почвы, малая мощность горизонтов, неглубокое проникновение почвообразование и другие факторы не способствуют развитию здесь контрастных геохимических барьеров. Большая часть элементов в почвах поймы Вилюя рассеяна ($L = 0,4 - 0,9$), Mg, Si и Ti распределены либо равномерно, либо с незначительным накоплением в мощном водно-аккумулятивном органогенном горизонте и лежащих ниже горизонтах, также обогащённых $C_{орг}$ (концентрации до 3,4%) (см. табл. 2) и глинистыми частицами (до 52,8%) (см. табл. 3).

4. Дискуссия

4.1. Профильные распределения геохимических свойств почв

Аналогично полученным нами результатам, Т.И. Васильева получила следующие результаты химического анализа почв Центральной Якутии: наибольшие концентрации среди макроэлементов имеют такие элементы (приведённые к полуторным оксидам), как

Si (60,8–84,2%), Al (8,3–16,9%), Fe (1,1–5,8%). Ca характеризуется аналогичными Fe концентрациями (0,9–5,0%), что объясняется отношением исследованных почв к типам палевые и чернозёмы, для которых характерно развитие на карбонатных почвообразующих породах. Соответственно, основным карбонатным соединением, входящим в их состав, является CaCO_3 – карбонат кальция. Содержание Ca в исследованных нами почвах, в основном относящихся к альфегумусовым (дерново-подзолы, дерново-подбуры), редко превышает 2%, что связано как раз со сниженным содержанием кальцита в почвообразующих породах. Основная часть элементов, за исключением Ca, в основном сосредоточенного в нижних горизонтах (Vca, C, Cca и т.п.), распределена в профилях почв равномерно, что особенно характеризует Si, составляющий основную часть порообразующих минералов – кремнезём (SiO_2). Также весьма высокие концентрации Si (SiO_2) и Al (Al_2O_3) – до 84,2 и 15,5%, соответственно, были отмечены А.П. Чевычеловым [\[32\]](#). Профильные распределения микроэлементов в фоновых почвах алмазодобывающих провинций Якутии характеризуются одной общей чертой – активным накоплением Li ($R = 3,3 - 3,6$), Ti (R до 16,6), V ($R = 3,3 - 3,6$), Cr ($R = 2,2-4,9$) и др. в надмерзлотных и мерзлотных горизонтах. Наименьшими значениями коэффициента R по данным Я.Б. Легостаевой и А.Г. Гололобовой, характеризуется Sn (в большинстве случаев) и Pb – R достигает 1,5–1,7. Органические вещества связываются в комплексы с Pb (R в органогенном горизонте = 1,2–1,8) и As ($R = 1,1-10,0$), что является наиболее часто наблюдаемой закономерностью в профилях криозёмов Ханья-Накынского междуречья. Ni, Cd и Cu в основном выносятся из почвенного профиля, демонстрируя слабую способность к сорбции органическим веществом (R по данным А.Г. Дягилевой варьируют в диапазоне от 0,4 до 0,9).

4.2. Катенарные распределения геохимических свойств почв

В таёжно-лесостепной почвенно-геохимической катене в приленском районе Центральной Якутской низменности были выявлены следующие характеристики латерального распределения элементов: Si распределён в почвах катены относительно равномерно ($0,8 < L < 1,3$), у Al наблюдается слабый вынос из почв автономных ландшафтов возвышенностей, накопление алюминия происходит в почвах склоновых и супераквальных геохимических ландшафтов с коэффициентом $L = 1,1 - 1,4$. Fe демонстрирует интенсивный вынос из почв автономных ландшафтов (содержания от 0,5 до 2,7%) с накоплением в нижней части почвенно-геохимической катены (концентрации до 5,4–5,8%) – значения коэффициента R достигают 2–5 единиц. Причём значения R в нижних горизонтах почв обычно значительно выше, чем в верхних. Катенарные распределения Ca и Mg в целом аналогичны закономерностям распределения Fe, отличие заключается в том, что верхние, особенно органогенные, горизонты почв, обогащённые кальцием, в сравнении с нижними минеральными горизонтами. Ti и Mn распределены в почвах ландшафтно-геохимической катены относительно равномерно ($0,7 < L < 1,2$). [\[32\]](#)

5. Заключение

Авторами изучены закономерности профильных (радиальных) и катенарных (латеральных) распределений геохимических свойств криогенных почв, разрезы которых были заложены в долине р. Вилюй в среднем её течении. Для этого были применены геохимические коэффициенты радиальной и латеральной дифференциации – R и L .

Различные свойства почв создают в изученных почвах широкое разнообразие вариантов профильных распределений, несводимое к единообразным закономерностям. Для

большей части элементов, рассмотренных в почвах, характерно элювиально-иллювиальное распределение в профилях автоморфных почв. Они характеризуются значениями коэффициента радиальной дифференциации R от 0,1 до 0,8. Исключение составляет Si. Наиболее сильно в профилях почв накоплены Ca, Ti, Mn, Fe, Zn, Zr, значения R которых в почвах достигают значений около 20,0. Элювиальные горизонты в целом отличаются выносом большей части элементов ($R = 0,1-0,9$), а Si вновь является исключением, поскольку входит в состав кремнезёма – минеральной основы почвенных частиц в песчаных почвах. Mg, Ti, Fe, V и Pb, накапливаются в надмерзлотном тёмноцветном горизонте C' ($R = 1,1-1,5$). Псевдофибровые горизонты почв отличаются аналогичных по морфологии и физико-химическим свойствам более высокими содержаниями химических элементов. Так была отмечена предполагаемая роль железосодержащих частиц в транслокации ионных форм других металлов: Ti, Mg, Mn ($RTi = 1,0 - 1,8$; $RMg = 1,0 - 1,4$; $RMn = 1,0 - 33,0$ и др.). Суглинистый гранулометрический состав водно-аккумулятивного горизонта $RYaq$ в стратозёме на пойме Вилюя способствует накоплению всех из изученных элементов, кроме Si, Ca, V и Zn. Многолетнемёрзлые горизонты почв характеризуются повышенными концентрациями практически всех элементов, в особенности макроэлементов.

Пределы варьирования коэффициентов L химических элементов весьма широки в исследованных почвах. Самыми широкими пределами варьирования отличаются Ca, Mn, FeZn и Y ($LCa = 0,3 - 1,8$; $LMn = 0,1 - 2,0$; $LFe = 0,6 - 2,1$; $LZn = 0,9 - 2,9$ и $LY = 0,3 - 1,4$). Такие элементы, как Al, Ti, Fe, Zn и Zr, аккумулируются в криогенных горизонтах подзолов на пологом склоне первой надпойменной террасы (ТЭ1 ландшафт), что, предположительно, связано с повышенным содержанием железа и его аморфных форм. Накопление микроэлементов – Zn, Y и др., – объясняется наличием сорбционного латерального геохимического барьера. Для большей части химических элементов в рассмотренной почвенно-геохимической катене характерно концентрирование в верхней части. В дерново-подбурах на первой надпойменной террасе Вилюя, особенно в криогенных горизонтах, сосредоточено большое количество Ca, Mn и Ti – $LCa = 1,8$, $LTi = 1,5$ и $LMn = 2,0$, соответственно. В серогумусовой почве на склоне террасы (ТЭ3 ландшафт) многие элементы рассеяны, например, $LMg = 0,8$, $LCa = 0,3$, $LMn = 0,1$ и т.д. Малая мощность горизонтов, неглубокое проникновение почвообразования и другие факторы не способствуют развитию здесь контрастных геохимических барьеров.

Использование коэффициентов латеральной и радиальной дифференциации представляется нам перспективным методом для составления характеристики почвенно-геохимической структуры территорий – определения характерных особенностей профильного распределения концентраций элементов в почвах, распределения элементов в элементарных геохимических ландшафтах, индикации вертикальных и горизонтальных геохимических барьеров и т.п. Тем не менее, в отдалённых районах криолитозоны Якутии, в том числе, в Центральной Якутской низменности, подобные работы немногочисленны. Валовой химический состав профилей мерзлотных почв исследован чаще, по сравнению с элементным составом почвенно-геохимических катен. При этом исследований, дифференцирующих горизонты почв на мерзлотные и немерзлотные практически отсутствуют, таким образом, весьма слабо исследовано влияние криогенных процессов на химический состав. Более активное использование методики, предложенной нами в данной статье, способно расширить современные представления о криогенной дифференциации валового состава химических элементов в почвах. Также детальный анализ фракционного (группового) состава отдельных элементов могут иметь диагностическое значение при изучении криогенеза почв и его влияния на почвообразование.

Благодарности

Авторы выражают благодарность профессору географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.б.н. М.И. Герасимовой и м.н.с. Дж.Ю.Васильчук за помощь в диагностировании и классифицировании почв, научному сотруднику ЭГЦ географического факультета МГУ Е.В. Терской и инженеру Л.В. Добрыдневой за помощь в проведении лабораторных работ, к.г.-м.н. Н.В. Торговкину за организацию летней полевой школы-семинара, а также А.Д. Белик и Е.Г. Егорову за помощь в полевых работах.

Библиография

1. Богданова М.Д., Гаврилова И.П., Герасимова М.И. Элементарные ландшафты как объекты ландшафтно-геохимического картографирования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. №1. С. 23–28.
2. Варламов С.П., Скрябин П.Н. Динамика теплового состояния грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2012. Т. 14, №1 (8). С. 2040–2044.
3. Васильчук Ю.К., Васильчук Дж.Ю., Гинзбург А.П. Криогенные почвы в долине р. Вилюй, Якутия // Арктика и Антарктика. 2021. № 3. С. 80–105. doi: 10.7256/2453-8922.2021.3.36671.
4. Габышев В.А., Габышева О.И. Особенности развития фитопланктона и физико-химических свойств воды среднего и нижнего Вилюя и Светлинского водохранилища // Экологическая оценка и картографирование. 2011. № 3. С. 45–54.
5. Габышева Л.П. Характеристика сосновых лесов тукуланов Лено-Вилюйского междуречья // Успехи современного естествознания. 2020. №10. С. 7–13.
6. Гаврильев П.П., Угаров И.С., Ефремов П.В. Криогенные процессы и изменение устойчивости пород ледового комплекса в Центральной Якутии при современном изменении климата и нарушении поверхности // Наука и образование. 2005. № 4 (40). С. 84–87.
7. Геокриология СССР. Средняя Сибирь /под ред Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – 414 с.
8. Гидрогеология СССР. Т. XX. Якутская АССР. – М.: Недра, 1970. – 383 с.
9. Государственная геологическая карта России (новая серия) в масштабе 1:1 000 000. Лист Р-50,51 (Олёкминск). Карта дочетвертичных образований / Комитет по геологии и использованию недр при правительстве Российской Федерации (составлена в ВСЕГЕИ имени А.П. Карпинского; авторы: Ковригина Е.К., Штейн Л.Ф., Семёнов Ю.Г., Зарубин А.С., Семериков А.А., Камалетдинов В.А.; картографы-составители: Сай Т.С., Круглова Л.И.; редактор: Ковригина Е.К.). Росгеолком, 1992.
10. Захарова В.И., Никифорова Е.Н. Флора и растительность окрестностей дефляционного озера Быранатталах (низовье р. Вилюй, Центральная Якутия) // Вестник СВФУ. 2016. № 1 (51). С. 5–14.
11. Иванов В.А., Рожин И.И. Моделирование деградации многолетнемёрзлых пород при потеплении климата в условиях Центральной Якутии на ближайшие 300 лет // Современные наукоёмкие технологии, 2021. № 10. С. 41–47.
12. Карта распространения криогенных процессов Республики Саха (Якутия). Масштаб 1: 5 000 000 / Фёдоров А.Н., Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Васильев Н.Ф., Калиничева С.В., Башарин Н.И., Константинов П.Я., Самсонова В.В.; гл. ред. М.Н. Железняк – Якутск: ИМЗ СО РАН. 2018. 1 л.

13. Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Шинкарёва Г.Л. Парагенетические ассоциации химических элементов в ландшафтах // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2019. № 6. С. 20–27.
14. Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
15. Конищев В.Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2009. № 4. С. 10–20.
16. Конищев В.Н., Рогов В.В. Влияние криогенеза на глинистые минералы // Криосфера Земли, 2008. Т. XII, № 1. С. 51–58.
17. Куть А.А. Эолово-мерзлотные образования (тукуланы) Центральной Якутии: строение, генезис, возраст, закономерности распространения / Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук. Якутск. 2015. 23 с.
18. Лебедева Л.С., Ефремов В.С., Христофоров И.И., Бажин К.И., Огонеров В.В., Павлова Н.А. Талики и формирование речного стока на малом водосборе в сплошной криолитозоне Якутии // Материалы международной научной конференции «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии» (Санкт-Петербург, 28–30 марта 2018 г.). 2018. С. 62–66.
19. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1: 1 500 000 / Федоров А.Н., Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Васильев Н.Ф., Макаров В.С. и др.; гл. ред. М.Н. Железняк – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2018. 2 л.
20. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Многолетние данные. Якутская АССР. Л.: Гидрометеиздат, 1989. Сер. 3. К. 1. Ч. 1–6. Вып. 24. 606 с.
21. Национальный атлас России. В четырех томах [Карты] / редкол.: А.В. Бородко (пред.), В.В. Свешников (гл. ред.) и др. – Москва: Роскартография. 2004–2008.
22. Николаев А.Н., Скачков Ю.Б. Влияние динамики снежного покрова на рост и развитие лесов в центральной Якутии // Криосфера Земли, 2011. Т. XV. № 3. С. 71–80.
23. Николаев А.Н., Угаров И.С. Различия режима увлажнения мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии и его влияние на рост лиственниц // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011. Т. 13, №1 (4). С. 1016–1019.
24. Николаева Н.А. Устойчивость ландшафтов бассейна р. Вилюй в Западной Якутии // Успехи современного естествознания, 2020. № 11. С. 88–94.
25. Основы биогеохимии: Учеб. пособие для геогр., биол., геолог., с.-х. спец. вузов. – М.: Высш. шк. 1998. – 413 с.
26. Паламарчук В.А., Лебедева Л.С., Баишев Н.Е. Результаты рекогносцировочного обследования источников подземных вод тукулана Махатта // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2022 г. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2022.
27. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высш. шк. 1975. 394 с.
28. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель. 1999. 764 с.
29. Пермьяков П.П., Варламов С.П., Скрыбин П.Н., Скачков Ю.Б. Численное моделирование термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата // Наука и образование. 2016. № 2. С. 43–48.
30. Полевой определитель почв. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева. 2008. – 182

с.

31. Сафронов А.Ф., Берзин А.Г., Фрадкин Г.С. Тектоническая природа локальных поднятий Вилуйской синеклизы // Геология нефти и газа, 2003. №4. С. 20 – 28.
32. Чевычелов А.П. Мерзлотные почвы Центральной Якутии: география, генезис и разнообразие // Материалы VII Международной научной конференции, посвященной 90-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ «Отражение био-, гео-, антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове» (Томск, 14–19 сентября 2020 г.). Издательский дом ТГУ, 2020. С. 98–101.
33. Шофман И.Л., Кинд Н.В., Пахомов М.М., Прокопчук Б.И., Виноградова С.Н., Сулержицкий Л.Д., Форова В.С. Новые данные о возрасте отложений низких террас в бассейне р. Вилуй // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. №47 1977. С. 100–107.
34. Шестернев Д.М. Физическое и химическое выветривание массивов горных пород в криолитозоне // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 3. С. 350–360.
35. Шмелёв Д.Г. Криогенез рыхлых отложений полярных областей Земли / Диссертация на соискание учёной степени кандидата географических наук. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, 2015. 155 с.
36. Fedorova S., Kryzhanovsky A. Combined scheme of permafrost water purification in Central Yakutia // IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering, 2020. 953, 012025. 9 pp. doi:10.1088/1757-899X/953/1/012025.
37. The Far North: Plant biodiversity and Ecology of Yakutia. Plant and Vegetation 3. Springer Science + Business Media B.V., 2010. 390 p. doi: 10.1007/978-90-481-3774-9.
38. <http://pogodaiklimat.ru/history/24641.htm>

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Район Центральной Якутии в среднем течении реки Вилуй является одним из уникальных по сочетанию развитых здесь криогенных процессов – морозобойного растрескивания, термосуффозии, термокарста, термоэрозии, солифлюкции, морозной сортировки, наледеобразования, поэтому получение данных о криогенном факторе формирования и динамики геохимических свойств местных почв является актуальным. Предметом исследований являлись почвы на территории Вилуйского округа Центрально-Якутской средне-таёжной подпровинции подзоны средне-таёжных лесов. На этой территории было выделено 9 зональных, 2 азональных и 7 интразональных типов почв, отмечается, что столь высокое разнообразие почвенного покрова является действие индивидуальных почвообразовательных макропроцессов на фоне криогенеза, типичного как для Центральной Якутии, так и в целом для криолитозоны. В процессе исследований были заложены 12 разрезов почв в различных ландшафтных условиях от плоской поверхности второй надпойменной террасы Вилуя до днищ малых эрозионных форм и термосуффозионных воронок. Пять разрезов из 12 составили почвенно-геохимическую катену левобережья Вилуя. Разрезы почв закладывались при помощи лопат. В случае достижения верхней границы ММП образцы мёрзлых пород выбивались из толщи при помощи топора. Образцы сезонно-талых горизонтов почв отбирались при помощи ножей в пластиковые пакеты. Общая масса каждого образца составляла 250–500 г. В полевых условиях горизонты почв описывались по схеме, предложенной для комплексного

описания в Классификации и диагностике почв России и Полевом определителе почв. Полевые названия почв также были даны исходя из сочетаний диагностических генетических горизонтов и признаков, указанных в Полевом определителе почв. В упакованном состоянии пробы были доставлены в химико-аналитическую лабораторию эколого-геохимического центра географического факультета МГУ, где были определены для всех проб: гранулометрический состав; кислотность водных вытяжек; общее содержание легкорастворимых солей; общее содержание органического углерода; Концентрации не силикатного и аморфного железа; валовые содержания макро- и микроэлементов.

Для характеристики пространственной неоднородности химического состава почв были использованы геохимические коэффициенты радиальной и латеральной дифференциации. В результате комплексных исследований установлено, что изученные почвы относятся к стволам син- (аллювиальная серогумусовая) и постлитогенного почвообразования (остальные почвы). Скорости аккумуляции речных наносов в аллювиальных почвах сопоставимы с темпами почвообразования, что приводит к циклическому характеру почвообразования в них. Почвы постлитогенного ствола относятся к следующим типам: дерново-подзолы и дерново-подбуры (почвы, развивающиеся на возвышенных участках рельефа – надпойменных террасах и их склонах), торфяно-глеезёмы (во влажных днищах малых эрозионных форм рельефа – оврагов и балок), серогумусовые, в том числе, погребённые под золовыми наносами на тукуланах, а также стратозёмы на речных поймах и псаммозёмы – на заболоченных и обводнённых участках внутри термосуффозионных воронок.

Научная новизна работы заключается в изучении закономерности профильных (радиальных) и катенарных (латеральных) распределений геохимических свойств криогенных почв, разрезы которых были заложены в долине р. Виллой в среднем её течении. Для этого были применены геохимические коэффициенты радиальной и латеральной дифференциации. Показано, что различные свойства почв создают в изученных почвах широкое разнообразие вариантов профильных распределений, несводимое к единообразным закономерностям.

Практическая ценность статьи заключается в том, что активное использование методики, предложенной авторами, способно расширить современные представления о криогенной дифференциации валового состава химических элементов в почвах.

Стиль структура и содержание статьи отвечают требованиям, предъявляемым к публичному представлению результатов научных исследований. Библиографический список достаточно полон и отражает современное состояние исследований в рассматриваемой области. Статья будет несомненно интересна и полезна специалистам а области геокриологии. В качестве замечания следует указать на неинформативность таблиц 1 и 2 в представленном в статье виде. В целом статья написана на хорошем методическом и научном уровне, имеет научную и практическую ценность, соответствует научному направлению журнала и рекомендуется к публикации.

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П. — Латеральная и радиальная дифференциация геохимического состава криогенных почв учебно-научного полигона Хановой, Большеземельская тундра // Арктика и Антарктика. — 2023. — № 1. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.1.40136 EDN: RDPROK URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=40136

Латеральная и радиальная дифференциация геохимического состава криогенных почв учебно-научного полигона Хановой, Большеземельская тундра

Васильчук Юрий Кириллович

ORCID: 0000-0001-5847-5568

доктор геолого-минералогических наук

профессор, Московский государственный университет им. МВ. Ломоносова (МГУ), географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2009

✉ vasilch_geo@mail.ru



Гинзбург Александр Павлович

инженер, Московский государственный университет имени МВ. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2007

✉ alexandrginzburg13154@yandex.ru



[Статья из рубрики "Почвы холодных равнинных и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2023.1.40136

EDN:

RDPROK

Дата направления статьи в редакцию:

05-04-2023

Аннотация: Предметом исследования являются почвенно-геохимические особенности криогенных южнотундровых ландшафтов учебно-научного полигона Хановой, расположенного вблизи одноимённого посёлка Воркутинского района Республики Коми. Составлены морфологические описания почвенных профилей в соответствии с современной российской классификационной системой. Выполнялись химико-аналитические лабораторные работы с целью установления значений физико-химических параметров почвенных горизонтов – pH, содержания легкорастворимых

солей, содержания органического углерода, гранулометрического состава, фракционного состава железа. Главным аспектом почвенно-геохимических свойств ландшафтов УНП Хановой являлся валовой химический состав криогенных почв. Валовые содержания химических элементов были определены методом рентгеновской флуоресценции при помощи портативного РФА. После этого рассчитаны геохимические коэффициенты радиальной (профильной) и латеральной (катенарной) дифференциации концентраций химических элементов – R и L. Наибольшими значениями коэффициентов R в профилях почв характеризуются глеевые горизонты почв, в том числе, надмерзлотные. Торфяные горизонты без примесей минеральной фракции почвы обеднены большей частью элементов ($R = 0,1 - 0,3$), а минеральные горизонты почв отличаются повышенными значениями RFe, RMn др. Нижняя часть катены с почвами преимущественно песчаного гранулометрического состава обеднена большей частью элементов (Ti, Zn, Zr и др.), а суглинистые почвы в верхней части накапливают эти элементы и формируют повышенные значения L-коэффициента.

Ключевые слова:

криогенные почвы, почвенно-геохимическая катена, макро- и микроэлементов, латеральная дифференциация, радиальная дифференциация, Большеземельская тундра, тундровые почвы, Воркутинский район, учебно-научный полигон Хановой, Коми республика

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (номер проекта РНФ 23-17-00082)

1. Введение

На севере Европейской территории России в криолитозоне многолетнемёрзлые породы (ММП) в основном распространены прерывисто^[7], в результате чего создаётся большое количество различных геокриологических обстановок в различных ландшафтных условиях^[22,25], причём при продвижении по Большеземельской тундре с юга на север ландшафтное разнообразие возрастает^[14]. Учебно-научный полигон Хановой, расположенный в ландшафтной подзоне южной тундры, характеризуется высоким разнообразием мерзлотно-ландшафтных обстановок, распространённым на небольшой территории, в результате чего исследования закономерностей распространения ММП и сопутствующих им природных процессов, в том числе, почвенно-геохимических^[3,5,19], здесь становятся возможными без существенных трудозатрат. Таяние ММП в результате климатических изменений особенно ярко проявляется в районе южной границы криолитозоны^[4]. Увеличение мощности сезонно-талого слоя (СТС) почв из года в год способствует росту глубины протекания активной миграции химических веществ и снижению контрастности профильных распределений содержания химических элементов.

2. Объекты и методы

2.1. Физико-географические условия района исследования

Географическое положение

Район исследования расположен на пологонаклонной надпойменной террасе реки Воркуты (юго-восток Большеземельской тундры) в среднем её течении ($67^{\circ}17'9.05''$ с.ш.,

63°39'25.38" в.д., высота над уровнем моря = 150 м). УНП Хановой представляет собой участок пологого склона площадью около 0,5 км², ограниченный с запада линией железной дороги Москва – Воркута, с востока – урезом реки Воркуты. Ближайшим населённым пунктом к полигону является посёлок Хановой с одноимённой железнодорожной станцией, прилегающей к полигону с юго-запада. От г. Воркуты район исследования удалён на 30 км к юго-западу (рис. 1).



- Административный центр
- Посёлки с постоянным населением
- Станции и вахтовые посёлки

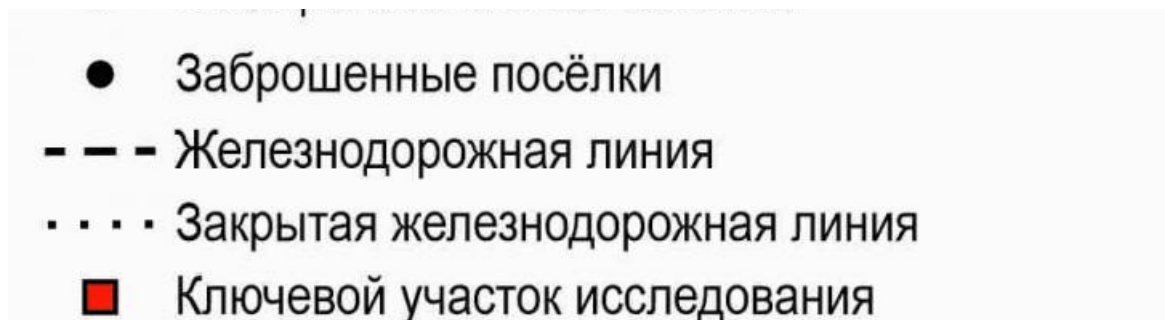
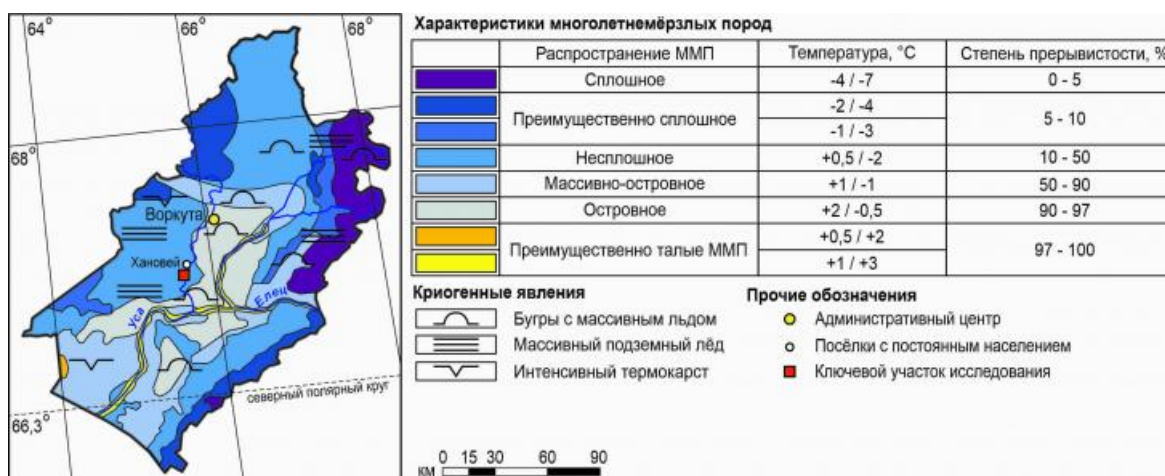


Рис. 1. Расположение УНП Хановей

Физико-географическая характеристика района исследования

Наибольшую площадь на территории Коми занимает обширная Печорская низменность долин рек Печоры и Усы [\[13\]](#). Наиболее древними отложениями являются ранне-докембрийские (возраст более 2 млрд. лет), а поверхность сложена ледниковыми и послеледниковыми валунными суглинками и песками с аллювиальными и озёрно-болотными песками, супесями и суглинками [\[1.8\]](#). Макроформы рельефа были образованы в результате проявлений неровностей кровли коренных отложений, а мезорельеф сформирован при активном действии экзогенных процессов – эрозии и аккумуляции. К таковым относятся возвышенности грядового типа (мусюры), широкие, хорошо выработанные речные долины, а также сочетания выпуклых торфяных бугров пучения (пальза) с заозёрными термокарстовыми понижениями. [\[9\]](#) Многолетнемёрзлые породы (ММП) имеют здесь несплошное (50–95% площади) и массивно-островное (10–50%) распространение (рис. 2). Температуры ММП несплошного распространения характеризуются диапазоном средних температур от 0,5 до –2,0°C, массивно-островного – от +1 до –1°C. Мощность сезонно-талого слоя (СТС) здесь достигает 1–1,7 м в зависимости от гранулометрического состава субстрата. [\[25\]](#) Характер растительного покрова оказывает значительное влияние на глубину промерзания и оттаивания.

Рис. 2. Геокриологическая карта Воркутинского района Республики Коми, по [\[25\]](#)

Климат Воркутинского района относится к субарктическому типу. Среднегодовая температура воздуха составляет –5,4°C, в июле он прогревается до +13,2°C, а наиболее холодный месяц – январь с температурой –19,5°C (по данным метеорологической станции Воркута [\[12\]](#)). Длительность вегетационного периода здесь составляет 92 дня, а сумма активных температур достигает 493°C. Влажность воздуха практически в течение всего года одинакова и составляет 81%. В среднем в год выпадает 507 мм атмосферных

осадков. Мощность снежного покрова здесь варьирует от 53 до 180 см. Междуречные пространства занимают почвы типа глеезёмов, а на пологих склонах развиты криометаморфические почвы [3, 19]. Различная мощность торфяного горизонта на полигоне обеспечивает классификационные различия криозёмов (профиль О – CR – C(g)) и торфяно-криозёмов (профиль Т – CR – C(g)), глеезёмов (профиль О – G – CG) и торфяно-глеезёмов (Т – G – CG) [11]. На почвах более лёгкого гранулометрического состава встречаются кустарничково-зеленомошные лишайниковые тундры, на суглинистых почвах развиты травяно-кустарничково-сфагновые ерниковые тундры в комплексах с пушицево-осоково-сфагновыми болотами. [6,18]

Более подробно физико-географические условия были описаны в нашей работе. [5]

2.2. Полевые методы исследований

Полевые работы были проведены на УНП Хановей и прилегающих к нему территориях в сентябре 2022 г. В процессе исследований были заложены 10 разрезов почв в различных ландшафтных условиях от низкой поймы реки Воркуты до слабовыпуклой поверхности междуречной равнины (рис. 2).

9 из 10 заложенных разрезов составили почвенно-геохимическую катену правобережья Воркуты. Разрезы почв закладывались при помощи лопат. В случае достижения верхней границы ММП образцы мёрзлых пород выбивались из толщи при помощи топора. Образцы сезонно-талых горизонтов почв отбирались при помощи ножей в пластиковые пакеты zip-lock. Общая масса каждого образца составляла 250–500 г. В полевых условиях горизонты почв описывались по схеме, предложенной для комплексного описания в Классификации и диагностике почв России [11] и Полевом определителе почв. [17] Полевые названия почв также были даны исходя из сочетаний диагностических генетических горизонтов и признаков, указанных в Полевом определителе почв. [17]

2.3. Лабораторные методы исследований

В упакованном состоянии пробы были доставлены в химико-аналитическую лабораторию эколого-геохимического центра (ЭГЦ) географического факультета МГУ (г. Москва). Они были высушены при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния, после чего подвергались соответствующим процедурам пробоподготовки для дальнейшего лабораторного изучения химического состава и физико-химических свойств. В лабораторных условиях были проанализированы следующие аналитические показатели почв: кислотность водной вытяжки (рН), общее содержание легкорастворимых солей (TDS), общее содержание органического углерода (C_{org}), гранулометрический состав почв (с указанием класса в соответствии с систематикой Н.А. Качинского), концентрации несиликатного (Fe_{nc}) и оксалоторастворимого (Fe_a) железа в почвах, а также валовое содержание макро- и микроэлементов.

Кислотность водных вытяжек

Для анализа кислотности почв проба была перетёрта фарфоровым пестиком в фарфоровой ступке, а затем просеяна сквозь сито с диаметром пор 1 мм. Кислотность была измерена ион-селективным электродом METTLER TOLEDO в суспензии, изготовленной в соотношении почвы к дистиллированной воде 1:2,5, а в случае анализа органогенных горизонтов соотношение уменьшалось до 1:25.

Общее содержание легкорастворимых солей

Пробоподготовка для выполнения анализа содержания легкорастворимых солей была аналогична описанной выше для исследования почвенной кислотности. Содержание водорастворимых солей в почвах было исследовано лабораторным кондуктометром METTLER TOLEDO в суспензии, изготовленной в соотношении почвы к дистиллированной воде 1:2,5.

Общее содержание органического углерода

Концентрации органического углерода в почвах были исследованы методом И.В. Тюрина с фотометрическим окончанием. Для этого образец почв перетирался фарфоровым пестиком в фарфоровой ступке, затем просеивался сквозь сито с диаметром пор 0,25 мм. Взвешенная на аналитических лабораторных весах навеска почвы массой 1 г заливалась 10 мл 0,4М бихромата калия ($K_2Cr_2O_7$) и помещалась в сушильный шкаф, разогретый до $+150^{\circ}C$, на 40 минут. Затем вытяжка остужалась при комнатной температуре и оттитровывалась 0,2М раствором соли Мора (двойная серноокислая соль железа и аммония - $FeSO_4 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$) в присутствии 5–6 капель фенилантраниловой кислоты ($C_{13}H_{11}NO_2$). Конечной точкой при данном виде окислительно-восстановительного титрования является смена окраски раствора с рыжевато-коричневой на тёмно-зелёную. Вычисление содержания органического углерода проводилось по формуле:

$$C_{орг}, \% = \frac{(V_1 - V_2) \times M \times 0,003 \times 100}{m}$$

где V_1 – объём раствора соли Мора, пошедший на титрование холостой пробы (пробы без навески) почвы ($см^3$); V_2 – объём раствора соли Мора, пошедший на титрование пробы с навеской почвы ($см^3$); M – молярность раствора соли Мора; 0,003 – молярная масса $\frac{1}{4} C$ (г/моль); 100 – коэффициент перевода на 100 г почвы; m – масса сухой навески почвы.

Гранулометрический состав

Образец почвы для гранулометрического анализа перетирался резиновым пестиком в фарфоровой ступке и просеян сквозь сито с диаметром пор 1 мм. Гранулометрический состав почв был исследован методом лазерной гранулометрии после перетирания навески в фарфоровой чашке резиновым пестиком с раствором пирофосфата натрия ($Na_4P_2O_7$). Пирофосфат применяется для устранения слипания частиц почвы. Анализ гранулометрического состава почв был измерен на лазерном гранулометре Fritsch Analysette-22 (Германия). Для классифицирования почв по содержанию фракции физической глины в них использовалась шкала Н.А. Качинского (табл. 1).

Таблица 1. Классификация почв подзолистого типа почвообразования по содержанию фракции физической глины (Н.А. Качинского)

Класс гранулометрического состава	Содержание физической глины, %
<i>Песчаные</i>	
Рыхло-песчаный	0 – 5
Связно-песчаный	5 – 10
Супесчаный	10 – 20
<i>Суглинистые</i>	
Легкосуглинистый	20 – 30
Среднесуглинистый	30 – 40

Среднесуглинистый	30 – 40
Тяжелосуглинистый	40 – 50
<i>Глинистые</i>	
Легкоглинистый	50 – 65
Среднеглинистый	65 – 80
Тяжелоглинистый	>80

Концентрации несиликатного и оксалаторастворимого железа

Определение дитионит-растворимых соединений железа выполнялось по методу Мера-Джексона. Навеску воздушно-сухой почвы, просеянной через сито с диаметром отверстий 1 мм, массой 2 г помещали в центрифужную пробирку вместимостью 50 см³. В пробирку приливали 20 мл 0,3М раствора цитратанатрия ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$) и 2,5 мл 1М раствора гидрокарбоната натрия (NaHCO_3), перемешивали круговыми движениями и нагревали на водяной бане до 800°C. Затем в пробирку вносили 0,5 г сухого порошка дитионита натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) и перемешивали стеклянной палочкой. После этого в пробирку добавляли 5мл насыщенного раствора хлорида натрия (NaCl), перемешивали и оставляли на водяной бане до образования хлопьевидного осадка. Затем проводили центрифугирование в течение 10 мин при 3000 об/мин, центрифугат сливали через сухой плотный фильтр в мерную колбу вместимостью 250 мл. Обработку почвы в центрифужной пробирке повторяли еще два раза, собирая центрифугаты в ту же мерную колбу. После охлаждения содержимое мерной колбы доводили дистиллированной водой до метки и перемешивали. Концентрация железа в полученном растворе определялась методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

Для анализа группового состава железа проба почвы была перетёрта фарфоровым пестиком в фарфоровой ступке, а затем просеяна сквозь сито с диаметром пор 1 мм. Экстракция окристаллизованных соединений железа из почв была выполнена методом Ф. Тамма, основанном на экстракции окристаллизованного железа с помощью буферного раствора Тамма (0,14М по $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ и 0,2М по $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$). Залитая буферным раствором навеска почвы массой 1 г профильтровывалась сквозь складчатый бумажный фильтр «синяя лента» с диаметром пор 0,45 мкм. Процедура фильтрования повторялась 3 раза, после чего раствор был разбавлен дистиллированной водой в мерной колбе объёмом 250 мл и разлит по пластиковым пробиркам. Анализ концентраций оксалаторастворимых форм железа был проведён методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

Валовые содержания макро- и микроэлементов

Концентрации макро- и микроэлементов были измерены в перетёртых в агатовой ступке и просеянных сквозь сито с диаметром пор 0,25 мм образцах почв методом рентген-флуоресцентного анализа (РФА). Для этого был использован портативный горно-геологический рентген-флуоресцентный анализатор Olympus Delta Professional (США). Этот прибор способен определять валовые концентрации 35 химических элементов с атомными массами от Mg до U.

2.4. Геохимические ландшафты и коэффициенты

Описания и характеристики геохимических особенностей ландшафта даны в соответствии с работами А.И. Перельмана и Н.С. Касимова^[16]. Для характеристики элементарных геохимических ландшафтов им были даны названия в соответствии с классификацией М.Д. Богдановой с соавторами^[2]. В качестве основного критерия выделения элементарных ландшафтов здесь используются формы (и элементы) рельефа.

Для характеристики пространственной неоднородности химического состава почв были использованы геохимические коэффициенты радиальной и латеральной дифференциации.^[15,16] Коэффициент радиальной дифференциации (R) используется для изучения профильной (вертикальной) неоднородности химического состава путём сравнения концентраций конкретных веществ в почвенных горизонтах с таковыми в горизонте почвообразующей породы:

$$R_x = R_{x(\text{гор.})} / R_{x(\text{пор.})}$$

где $R_{x(\text{гор.})}$ – концентрация химического вещества x в почвенном горизонте; $R_{x(\text{пор.})}$ – концентрация химического вещества x в почвообразующей породе.

Коэффициент латеральной дифференциации (L) используется для изучения катенарной (субгоризонтальной) неоднородности химического состава ландшафта. В данном случае сравнение ведётся между концентрацией химического вещества x в почвах подчинённых и автономных (элювиальных) элементарных геохимических ландшафтов. Этот показатель призван охарактеризовать латеральную миграцию химических веществ в почвах, связанных едиными потоками влаги, перемещающейся по рельефу сверху вниз под действием силы тяжести. В качестве модельной области при использовании L выступает почвенно-геохимическая катена:

$$L_x = L_{x(\text{подч.})} / L_{x(\text{авт.})}$$

где $L_{x(\text{подч.})}$ – концентрация химического вещества x в подчинённом элементарном геохимическом ландшафте; $L_{x(\text{авт.})}$ – концентрация химического вещества x в автономном (элювиальном) элементарном геохимическом ландшафте.

При анализе катенарной неоднородности химического состава почв в долине Вилюя параллельно приводятся данные о коэффициентах L сезонно-талых и многолетнемёрзлых горизонтов почв.

3. Результаты

3.1. Почвенно-геохимическая структура учебно-научного полигона Хановой

Встреченные на Хановейском УНП криогенные почвы представлены профилями типов криометаморфические, криозёмы, торфяно-глеезёмы, торфяные, а также серогумусовые и аллювиальные. Среди подтипов широко распространены глеевые и глееватые, поскольку в надмерзлотных горизонтах суглинистого гранулометрического состава часто развиваются восстановительные условия среды, что приводит к морфологическим проявлениям восстановления железа. Криогенно-ожелезнённые подтипы почв, также часто встречаемые здесь свидетельствуют о проявлении смыкания нижней границы ММП с фронтом промерзания сверху, в месте которого концентрируется окисленная форма железа.^[11] Подробно условия почвообразования и морфологическое строение почвенных профилей рассмотрены в нашей работе.^[5]

Заложенная на левом берегу р. Воркуты почвенно-геохимическая катена представляет собой последовательно расположенные от приводораздельной поверхности до низкой поймы Вилюя элементарные геохимические ландшафты (рис. 3): элювиальный первого порядка с преобладанием радиальной миграции вещества (Э_{1p}) ландшафт приводораздельной поверхности, элювиальные ландшафты второго порядка (Э_2)

надпойменных террас – третьей и второй, трансэлювиальные ландшафты со слабым (ТЭ₁) и интенсивным (ТЭ₃) выносом на склонах надпойменных террас, поверхность первой надпойменной террасы, покрытой слоем элювиального материала и слабо выраженной в рельефе, всё же обособлена и представляет собой трансэлювиально-аккумулятивный ландшафт (ТЭА), а ниже по рельефу располагается поверхность низкой поймы – супераквальный транзитный (СТ₃) ландшафт. Аквальный ландшафт (А) р. Воркуты является замыкающим в катенарной цепи, однако рассмотрение его геохимической специфики не входит в задачи данного исследования.

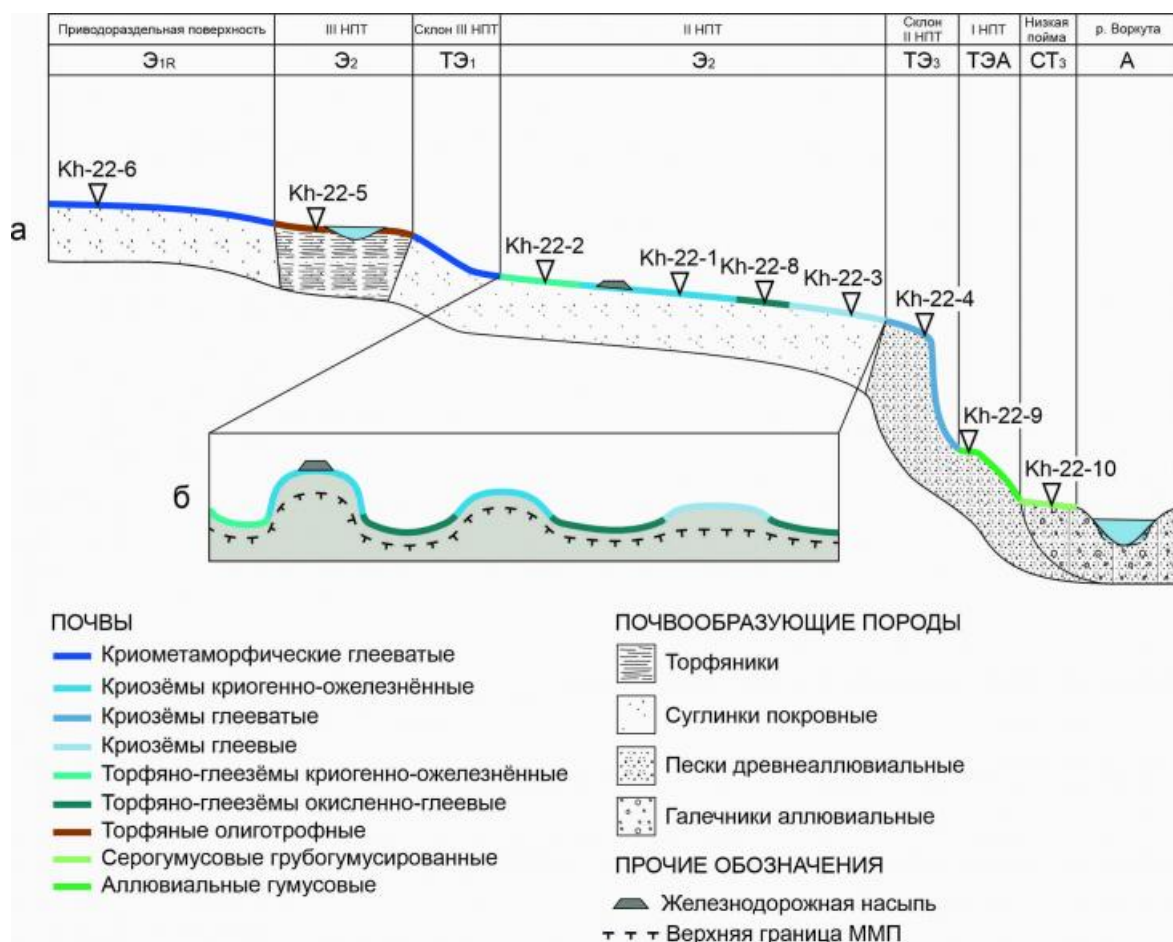


Рис. 3. Почвенно-геохимическая catena на учебно-научном полигоне Хановой (а) и микроструктура почвенного покрова первой надпойменной террасе (б)

Верхние части почвенно-геохимической catena на элементах рельефа с улучшенным дренажом, глубиной залегания ММП более 1 м, а также суглинистым гранулометрическим составом почвообразующих пород (рис. 3а) характеризуются ареалами криометаморфических почв (приводораздельная поверхность, склон третьей надпойменной террасы). На третьей и второй надпойменных террасах развиты глубоко протаивающие (более 2 м) торфяные отложения, на третьей их мощность превышает 2 м (рис. 3а), что позволяет выделить на ней ареал торфяных олиготрофных почв. На второй надпойменной террасе мощность торфа не превышает 0,5 м, а ниже залегают суглинистые почвообразующие породы (верхняя граница ММП расположена на глубине около 0,6–0,7 м), что соответствует типичному строению профилей торфяно-глеезёмов (рис. 3а). Этот тип почвы встречается в понижениях между торфяными буграми пучения – пальза, а на вершинах бугров развиты криозёмы криогенно-ожелезнённые и глеевые (последние – в почвах пятен медальонов). Криогенное пучение здесь является основным процессом, осложняющим рельеф и, как следствие, почвенный покров (рис.

36). В нижней части катены почвообразующими породами являются песчаные отложения склонов и первой фрагментарно представленной надпойменной террасы, а ниже расположена низкая пойма на галечниковом материале. На песчаных отложениях развиваются криозёмы глееватые и серогумусовые почвы, на галечниках низкой поймы распространены аллювиальные гумусовые почвы (рис. 3а). Глубина сезонного оттаивания на древнеаллювиальных песках и галечниках превышает 2 м, к тому же, вблизи уреза реки развита таликовая зона, ввиду чего многолетнемёрзлые горизонты в профилях почв не были встречены.

3.2. Физико-химические свойства криогенных почв УНП Хановой

Кислотность водных вытяжек почв варьирует в диапазоне pH от 4,7 до 7,5, что соответствует грациям от кислых до нейтральных. Более кислыми реакциями отличаются поверхностные органогенные горизонты почв (от 4,7 до 6,2), а к нижней части профилей значения повышаются и достигают 7,5. Среднее значение pH составляет 6,1. Варьирование в пределах профилей почв происходит с коэффициентом вариации 12,4% (табл. 3).

Легкорастворимые соли содержатся в почвах в пределах от 1,8 до 266 мг/л. Содержание солей в среднем равно 35,4 мг/л, квартили варьирования большей части концентраций составляют 8,7 (25%) и 49,1 (75%) мг/л, а значительные увеличения концентраций (рис. 4а) связаны с накоплением солей в верхних частях профилей, где концентрации выше среднепрофильных в 2–5 раз (табл. 2). Соответственно, средние значения электропроводности почв составляют 70,7 мкС/см, варьирование происходит в широких пределах от 3,6 до 532 мкС/см.

Содержания органического углерода в большей части изученных почв весьма высоки за счёт того, что органогенные горизонты зачастую представлены торфяниками или тундровыми подстилками слабой степени разложения. Максимальные содержания C_{org} достигают 45,8%, а среднее содержание C_{org} во всех изученных почвах составляет 14,3%. В верхних частях профилей, где сосредоточено больше всего органического вещества, а к нижней части профиля содержание C_{org} резко снижается (иногда более, чем в 10 раз). Варьирование происходит в пределах от 0,5 до 45,8% (табл. 3, рис. 4а).

Содержание физической глины в изученных почвах в среднем равно 33,5%, наименьшее содержание составляет 6,6% (связно-песчаный гранулометрический состав горизонта - табл. 1), наибольшее содержание равно 59,9% (легкоглинистый гранулометрический состав - табл. 1). Коэффициент вариации содержания физической глины имеет значение около 40% (табл. 3), что свидетельствует о весьма контрастном распределении содержания гранулометрических фракций с диаметрами меньше 10 мкм в профилях почв. В верхней части катены наблюдаются почвы супесчаного и суглинистого гранулометрического состава (рис. 3), а нижней части профиля рельефа почвообразующие породы имеют облегчённый состав.

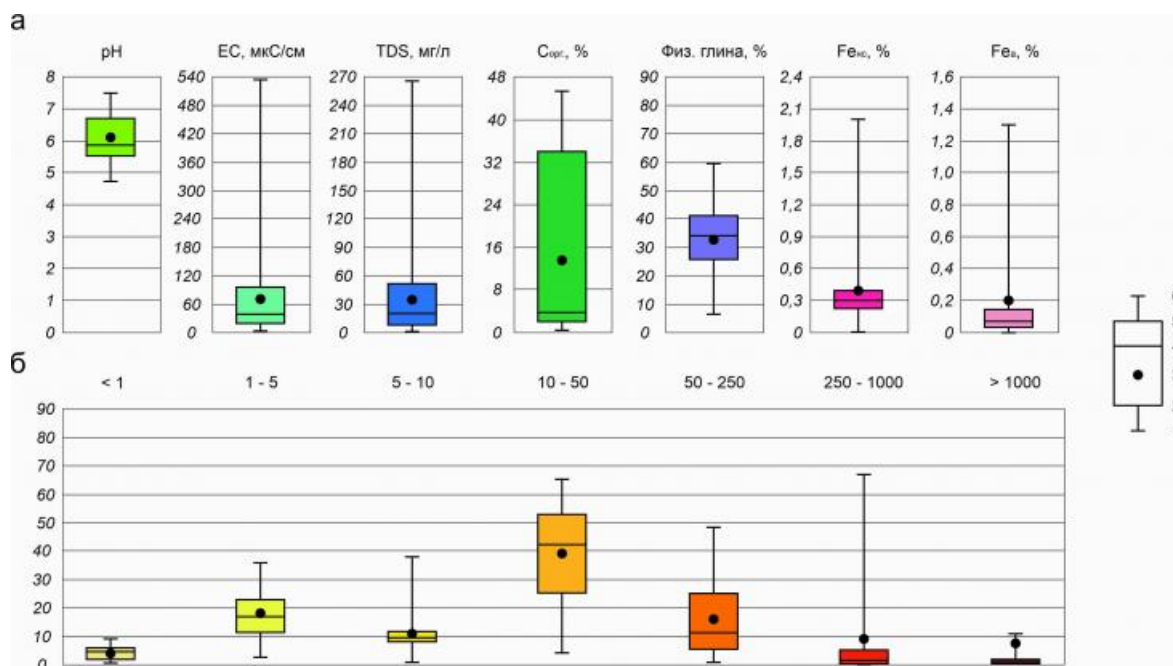


Рис. 4. Физико-химические свойства криогенных почв УНП Хановей: 1 – минимальное значение; 2 – квартиль 25%; 3 – среднее значение; 4 – медианное значение; 5 – квартиль 75%; 6 – максимальное значение

Наиболее часто встречаемой фракцией в изученных почвах является фракция с диаметром 10–50 мкм (рис. 4б), среднее содержание которой равно 39,2%, а само распределение наиболее близко к нормальному. Также весьма широко распространены частицы размерами 1–5 и 50–250 мкм (средние содержания равны 17,9 и 16,7%, соответственно). Наибольшими коэффициентами вариации обладают частицы с размерами 250–1000 и >1000 мкм (186,6 и 346%, соответственно) – эта фракция наиболее контрастно распределена в почвенно-геохимической катене, особенно частицы с размерами >1000, которые вообще встречаются не повсеместно.

Групповой состав железа представлен в основном группой силикатных соединений, входящих в состав породообразующих минералов. Доля несиликатной группы соединений железа в составе валового содержания достигает всего 2% (табл. 2), такими содержаниями Fe_{hc} отличаются глубокие минеральные горизонты почв, что предполагает фракционирование железа в горизонтах с динамичными показателями окислительно-восстановительного потенциала и активными проявлениями процесса криогенного растрескивания, из-за которого кристаллические решётки минералов разрушаются и содержащиеся в них атомы Fe переходят в состав других химических соединений. Доля аморфной фракции, во-первых, очень мала в исследованных профилях почв – максимум до 0,6% (табл. 2), во-вторых, распределена в них практически (0,1–0,3%) равномерно (рис. 4а). Редкие исключения составляют высокие значения (выше 1%) Fe_a, предположительно, являющиеся свидетельством активного взаимодействия минеральной и органогенной фракции почв на границах соответствующих горизонтов.

Таблица 2. Физико-химические свойства почв УНП Хановей

Образец №	Глубина, см	pH	TDS, мг/л	C _{орг.} , %	Физ. Глина, %	Fe _{hc} , %	Fe _a , %
Kh-22-1/1	0-3(5)	5,2	81,6	35,9	14,9	0,2	0,1
Kh-22-2/1	3(5)-10	5,0	15,7	9,5	30,4	0,4	0,1

Kh-22- 1/2	3(3)- 13(34)	3,0	15,7	8,5	30,7	0,7	0,1
Kh-22- 1/3	13(34)- 28	6,3	5,5	1,7	33,6	0,2	0,1
Kh-22- 1/4	28- 47(80)	6,2	15,4	1,6	35,2	0,3	0,0
Kh-22- 1/5	47(80)- 120	7,3	22,0	4,1	28,9	0,8	0,6
Kh-22- 2/1	0-25	5,0	60,6	41,6	16,7	0,4	0,1
Kh-22- 2/2	25-29	6,4	17,1	3,9	40,7	0,4	0,1
Kh-22- 2/3	29-43	5,2	47,5	2,0	37,5	0,3	0,1
Kh-22- 2/4	43-48	5,8	58,3	0,5	32,5	2,0	1,1
Kh-22- 2/5	48-50	5,9	15,4	14,5	25,0	0,2	0,2
Kh-22- 2/6	50...	6,0	21,8	25,1	29,5	0,4	0,2
Kh-22- 3/1	0-1	5,5	105,0	8,5	18,1	0,3	0,1
Kh-22- 3/2	1--18	7,5	52,2	13,3	29,5	0,2	0,0
Kh-22- 3/3	18-40	5,6	8,4	1,3	47,0	0,4	0,1
Kh-22- 4/1	0-2(8)	5,7	33,9	9,6	30,9	0,5	0,1
Kh-22- 4/2	2(8)- 10(19)	7,1	9,8	2,3	43,4	0,5	0,3
Kh-22- 4/3	10--37	6,7	6,4	1,3	53,1	0,2	0,1
Kh-22- 4/4	10(19)- 37	6,7	7,5	3,0	36,7	0,7	0,1
Kh-22- 4/5	37+	7,2	17,7	2,7	39,2	0,5	0,0
Kh-22- 5/1	0-10	6,2	63,6	45,8	35,5	0,2	0,0
Kh-22- 5/2	10--44	5,1	34,3	39,7	32,2	0,2	0,1
Kh-22- 5/3	44-66	5,6	18,2	41,3	59,9	0,3	0,1
Kh-22- 5/4	66-100	5,9	9,4	35,2	40,0	0,1	0,1
Kh-22- 5/5	100-145	5,4	1,8	39,7	44,1	0,1	0,1
Kh-22- 6/1	0-1	5,7	5,5	2,0	42,0	0,2	0,1
Kh-22- 6/2	1--16	5,9	6,1	1,6	45,5	0,6	0,1

Kh-22-6/3	16...	6,5	5,9	0,6	26,2	0,2	0,1
Kh-22-7/1	0-3(7)	5,8	4,0	2,4	0,0	0,3	0,1
Kh-22-7/2	3(7)-11(18)	6,8	8,9	2,3	59,3	0,4	0,1
Kh-22-7/3	11(18)-70(72)	6,6	5,6	2,3	57,0	0,4	0,1
Kh-22-7/4	70 (72)...	5,6	11,3	2,0	37,5	0,2	0,0
Kh-22-8/1	0--2	4,7	121,0	42,9	6,6	0,1	0,0
Kh-22-8/2	2--11	5,5	50,6	35,3	16,0	1,8	0,0
Kh-22-8/3	11-21(23)	7,3	4,5	2,1	53,2	0,6	0,1
Kh-22-8/4	21(23)-27	6,1	23,0	5,4	36,4	0,3	0,1
Kh-22-8/5	27-31	5,6	34,0	2,1	42,4	0,2	0,1
Kh-22-8/6	31-45	5,3	39,0	38,4	12,0	0,4	1,3
Kh-22-8/7	45...	5,0	76,3	41,9	9,0	0,1	0,0
Kh-22-9/1	0-0,5	6,8	266,0	3,3	32,8	0,3	0,1
Kh-22-9/2	0,5-20	6,0	59,5	32,5	12,7	0,3	0,1
Kh-22-9/3	20...	6,9	23,7	3,4	34,5	0,3	0,1
Kh-22-10/1	0--12	7,1	27,0	3,7	27,6	0,2	0,1
Kh-22-10/2	12...	7,1	20,2	8,2	16,8	2,0	1,1

Таблица 3. Статистические значения физико-химических свойств почв УНП Хановей

Статистические показатели	pH	TDS, мг/л	ЕС, мкС/см	C _{орг} , %	Физ. глина, %	Fe _{НС} , %	Fe _а , %
Среднее арифметическое	6,1	35,4	70,7	14,3	33,5	0,4	0,2
Стандартное отклонение	0,8	45,8	91,5	16,4	13,3	0,4	0,3
Коэффициент вариации, %	12,4	129,3	258,7	114,5	39,9	100,3	166,6
Минимальное значение	4,7	1,8	3,6	0,5	6,6	0,1	0,0
Квартиль 25%	5,5	8,7	17,3	2,1	26,9	0,2	0,1
Медианное значение	5,9	20,2	40,4	3,9	34,5	0,3	0,1

Квартиль 75%	6,7	49,1	98,1	33,9	41,4	0,4	0,1
Максимальное значение	7,5	266,0	532,0	45,8	59,9	2,0	1,3

Таблица 4. Гранулометрический состав почв УНП Хановой (процентное содержание гранулометрических фракций (мкм) в %)

	Глубина, см	< 1	1--5	5--10	10--50	50--250	250-- 1000	>1000
Kh-22-1/1	0-3(5)	1,2	7,4	6,3	39,7	41,4	4	0
Kh-22-1/2	3(5)-13(34)	3,1	15,6	11,7	62,1	7,5	0	0
Kh-22-1/3	13(34)-28	5,6	19,4	8,6	58,5	7,9	0	0
Kh-22-1/4	28-47(80)	6,6	20,4	8,2	53,8	11	0	0
Kh-22-1/5	47(80)-120	3,2	16,8	8,9	30,7	39,3	1,1	0
Kh-22-2/1	0-25	1,1	7,6	8	18	26,3	38,4	0,6
Kh-22-2/2	25-29	5,3	23,3	12,1	54,1	5,2	0	0
Kh-22-2/3	29-43	5,8	21,9	9,8	57,8	4,7	0	0
Kh-22-2/4	43-48	7	16,1	9,4	54,9	12,6	0	0
Kh-22-2/5	48-50	2,8	13,4	8,8	50,5	24,5	0	0
Kh-22-2/6	50+	2,7	15,4	11,4	57,8	12,7	0	0
Kh-22-3/1	0-1	1,7	9,5	6,9	26,8	32,7	21,9	0,5
Kh-22-3/2	1--18	2,2	14,2	13,1	18,6	9,3	39,5	3,1
Kh-22-3/3	18-40	7,1	30,6	9,3	42,3	5,2	2,1	3,4
Kh-22-4/1	0-2(8)	4,2	17,2	9,5	46,3	22,8	0	0
Kh-22-4/2	2(8)-10(19)	6,3	26,2	10,9	53,1	3,5	0	0
Kh-22-4/3	10--37	8,7	32,3	12,1	40,8	6,1	0	0
Kh-22-4/4	10(19)-37	5,7	22,8	8,2	20,4	18,1	24,8	0
Kh-22-4/5	37+	5,2	23,2	10,8	51,3	9,5	0	0
Kh-22-5/1	0-10	6,3	17	12,2	28,4	32,9	3,2	0
Kh-22-	10--44	2,4	3,5	26,3	19,5	48,3	0	0

5/2								
Kh-22-5/3	44-66	5,9	16,2	37,8	24,3	15,8	0	0
Kh-22-5/4	66-100	5	11,2	23,8	36,4	21,7	1,9	0
Kh-22-5/5	100-145	6,5	27,1	10,5	52,9	3	0	0
Kh-22-6/1	0-1	6,6	25,7	9,7	53,2	4,8	0	0
Kh-22-6/2	1--16	9,1	27,9	8,5	48,9	5,6	0	0
Kh-22-6/3	16+	4,3	14	7,9	65,2	8,6	0	0
Kh-22-7/1	0-3(7)	1,6	11,3	23,9	58,3	4,9	0	0
Kh-22-7/2	3(7)-11(18)	8,2	36,2	14,9	39,2	1,5	0	0
Kh-22-7/3	11(18)-70(72)	8,4	35,9	12,7	39,3	3,7	0	0
Kh-22-7/4	70(72)+	5,4	21,8	10,3	56	6,5	0	0
Kh-22-8/1	0--2	0,5	3,1	3	4,5	10,3	67,6	11
Kh-22-8/2	2--11	1	7,2	7,8	16,2	28	39,6	0,2
Kh-22-8/3	11-21(23)	9,5	33,7	10	43,3	3,5	0	0
Kh-22-8/4	21(23)-27	5,2	19,7	11,5	54,8	8,8	0	0
Kh-22-8/5	27-31	6,8	25,5	10,1	52,9	4,7	0	0
Kh-22-8/6	31-45	0,7	5,4	5,9	16,7	36,4	34,9	0
Kh-22-8/7	45+	0,7	4,4	3,9	5,5	14,3	60,6	10,6
Kh-22-9/1	0-0,5	3,7	19,3	9,8	31,7	35,4	0,1	0
Kh-22-9/2	0,5-20	0,7	5,6	6,4	49,3	38	0	0
Kh-22-9/3	20+	5	20,9	8,6	18	40,4	7,1	0
Kh-22-10/1	0--12	3	15,6	9	25,7	17,1	29,6	0
Kh-22-10/2	12+	4,8	7,2	4,8	9,7	24,6	48,9	0

3.3. Элементный состав криогенных почв УНП Хановей

Кремний и железо, как главные составляющие минералогической основы почв УНП Хановей, характеризуются наибольшими средними концентрациями среди всех

изученных элементов. Средние содержания Si и Fe в почвах варьируют в пределах от 2 до 4%, при этом соединения кремния распределены в почвах более нормально (рис. 5а), а для соединений железа более характерны весьма узкие квартили распределений и более широкий, по сравнению с кремнием, интервал распределения в целом (рис. 5а). Остальные макроэлементы – Mg, Al, Ca, Ti и Mn, – имеют концентрации, не превышающие 1,2%, из них наибольшие концентрации у Ca (до 1,18%), Al и Ti распределяются весьма широко с максимальными значениями концентраций, достигающими 1 и 0,92%, соответственно, а средние концентрации варьируют в пределах от 0,2 до 0,4%. Mg и Mn имеют концентрации, редко превышающие 0,1% (рис. 5а, табл. 5).

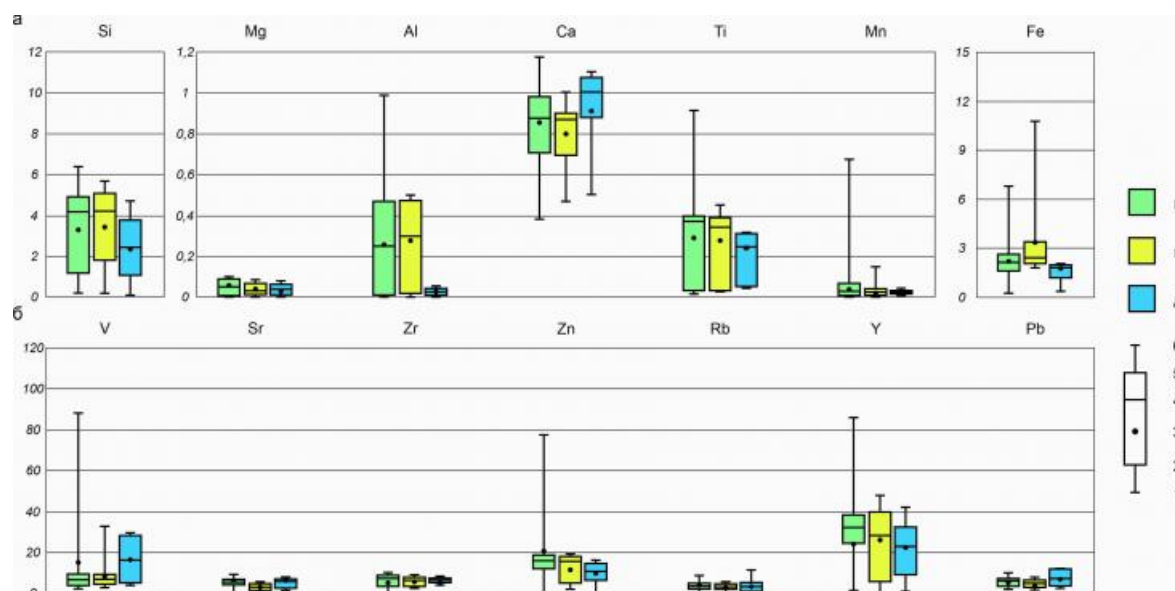


Рис. 5. Валовой элементный состав криогенных почв УНП Хановей: а) макроэлементы, б) микроэлементы; в) сезонно-талые горизонты; г) криогенные сезонно-талые горизонты; д) многолетнемёрзлые горизонты; 1 – минимальное значение; 2 – квартиль 25%; 3 – среднее значение; 4 – медианное значение; 5 – квартиль 75%; 6 – максимальное значение

Среди микроэлементов наибольшими концентрациями отличаются V, Zn и Y, в распределениях которых главной чертой является весьма расширенный диапазон варьирования концентраций в горизонтах сезонно-талого слоя без признаков криогенеза, а также широкий диапазон варьирования концентраций V и Y в многолетнемёрзлых горизонтах (рис. 5б). Остальные микроэлементы- Sr, Zr, Rb и Pb, – содержатся в почвах в весьма низких концентрациях, не превышающих 10 мг/кг (табл. 6).

Среди наиболее ярко выраженных признаков криогенного распределения элементов в почвах УНП Хановей обнаруживаются увеличения средних (около 1%) концентраций Ca (рис. 5а), квартили содержаний которого также смещены к верхним пределам содержания, относительно сезонно-талых и криогенных сезонно-талых горизонтов. Среди остальных макроэлементов наиболее значительно отличаются от двух других групп горизонтов содержание Al в горизонтах ММП (рис. 5а). Fe в многолетнемёрзлых горизонтах, напротив, распределено со снижениями средних значений и квартилей содержаний к нижним пределам. Также Fe распределено в криогенных сезонно-талых горизонтах почв с повышением средних концентраций относительно сезонно-талых и многолетнемёрзлых, что особенно заметно на примере максимальных содержаний – 11% (в сравнении с сезонно-талыми – 7%; и многолетнемёрзлыми – 2%).

Таблица 5. Содержания макроэлементов в почвах УНП Хановей (в %)

Разрез	Глубина, см	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Fe
Kh-22-1/1	0-3(5)	0,01	0,31	1,25	0,39	0,12	0,01	1,65
Kh-22-1/2	3(5)-13(34)	0,01	0,01	4,95	0,80	0,38	0,02	1,37
Kh-22-1/3	13(34)-28	0,01	0,50	5,59	0,91	0,43	0,02	1,92
Kh-22-1/4	28-47(80)	0,01	0,01	5,45	1,12	0,40	0,03	2,05
Kh-22-1/5	47(80)-120	0,01	0,01	4,34	1,05	0,32	0,06	2,27
Kh-22-2/1	0-25	0,01	0,01	0,58	0,60	0,07	0,66	3,54
Kh-22-2/2	25-29	0,01	0,37	6,24	0,82	0,45	0,03	2,57
Kh-22-2/3	29-43	0,01	0,43	4,04	0,96	0,35	0,04	3,10
Kh-22-2/4	43-48	0,01	0,37	0,19	0,43	0,03	0,16	10,92
Kh-22-2/5	48-50	0,01	0,01	3,69	0,98	0,36	0,06	2,44
Kh-22-2/6	50+	0,01	0,01	1,48	1,10	0,17	0,07	2,35
Kh-22-3/1	0-1	0,01	0,49	4,21	0,70	0,34	0,04	2,92
Kh-22-3/2	1--18	0,01	0,01	2,47	0,86	0,32	0,07	2,44
Kh-22-3/3	18-40	0,01	0,01	4,30	0,91	0,38	0,04	2,07
Kh-22-4/1	0-2(8)	0,01	0,35	4,18	0,85	0,34	0,05	2,61
Kh-22-4/2	2(8)-10(19)	0,01	0,42	6,03	0,86	0,41	0,04	2,70
Kh-22-4/3	10--37	0,01	0,01	3,31	0,91	0,34	0,04	2,81
Kh-22-4/4	10(19)-37	0,01	0,47	5,05	0,90	0,32	0,03	2,53
Kh-22-4/5	37...	0,01	0,48	3,10	0,92	0,35	0,04	2,76
Kh-22-5/1	0-10	0,01	0,23	0,90	0,99	0,32	0,02	0,80
Kh-22-5/2	10--44	0,01	0,85	1,20	0,95	0,25	0,03	0,40
Kh-22-5/3	44-66	0,01	0,27	1,10	0,88	0,75	0,08	0,56
Kh-22-5/4	66-100	0,01	0,97	0,80	0,55	0,95	0,08	0,97

Kh-22-5/5	100-145	0,01	0,13	0,40	0,74	0,48	0,05	0,83
Kh-22-6/1	0-1	0,01	0,56	4,98	0,84	0,38	0,03	2,64
Kh-22-6/2	1--16	0,01	0,49	4,00	1,01	0,36	0,07	3,16
Kh-22-6/3	16...	0,01	0,21	1,66	0,67	0,04	0,06	0,96
Kh-22-7/1	0-3(7)	0,01	0,01	4,79	0,85	0,39	0,03	2,26
Kh-22-7/2	3(7)-11(18)	0,01	0,01	3,09	0,80	0,35	0,03	2,68
Kh-22-7/3	11(18)-70(72)	0,01	0,46	5,00	0,97	0,40	0,08	3,45
Kh-22-7/4	70 (72)...	0,01	0,46	5,61	0,87	0,40	0,03	2,22
Kh-22-8/1	0--2	0,01	0,01	0,18	0,45	0,01	0,02	0,36
Kh-22-8/2	2--11	0,01	0,25	0,20	0,44	0,01	0,15	7,04
Kh-22-8/3	11-21(23)	0,01	0,01	5,65	0,85	0,41	0,04	2,64
Kh-22-8/4	21(23)-27	0,01	0,50	5,17	1,11	0,36	0,06	2,20
Kh-22-8/5	27-31	0,01	0,55	4,45	0,89	0,41	0,03	2,21
Kh-22-8/6	31-45	0,01	0,23	0,20	0,59	0,01	0,04	4,76
Kh-22-8/7	45...	0,01	0,01	0,13	0,51	0,11	0,07	0,20
Kh-22-9/1	0-0,5	0,01	0,01	4,51	1,19	0,31	0,07	2,28
Kh-22-9/2	0,5-20	0,01	0,01	1,45	0,61	0,08	0,03	2,58
Kh-22-9/3	20...	0,01	0,01	5,48	0,89	0,22	0,05	1,88
Kh-22-10/1	0--12	0,01	0,01	4,60	1,09	0,38	0,02	2,39
Kh-22-10/2	12...	0,01	0,01	4,35	1,02	0,30	0,05	2,26

Таблица 6. Содержания микроэлементов в почвах УНП Хановой (в г/кг)

Разрез	Глубина, см	V	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Pb
Kh-22-1/1	0-3(5)	5	0,9	1,9	4,5	0,7	6,1	3,8
Kh-22-1/2	3(5)-13(34)	5	1,6	5,4	16,1	2,2	36,8	2,1
Kh-22-1/3	13(34)-27(72)	5	3,7	6,1	19,3	2,3	42,8	1,4

1/3	28	5	4,9	6,1	20,4	3,4	39,8	1,7
Kh-22-1/4	28-47(80)	5	4,9	6,1	20,4	3,4	39,8	1,7
Kh-22-1/5	47(80)-120	29,6	4,9	5	14,3	2,1	43,4	1,7
Kh-22-2/1	0-25	5	5,5	1	7,2	1,3	5,3	1,5
Kh-22-2/2	25-29	5	4,8	7	17,3	2,8	39,3	1,4
Kh-22-2/3	29-43	5	5,8	6,9	18,7	3,2	33,6	5
Kh-22-2/4	43-48	5	1,3	5	3,2	5	1	3,1
Kh-22-2/5	48-50	26,2	7,7	5	17,3	3	31,6	1,4
Kh-22-2/6	50+	5	6,7	3,4	9,3	11,6	12,8	5
Kh-22-3/1	0-1	23,2	4,5	6,7	12,7	2,3	28,4	3,7
Kh-22-3/2	1--18	5	4,6	5,3	14	2,8	27	1,1
Kh-22-3/3	18-40	5	2,8	5,7	18,3	3,2	47,9	1,4
Kh-22-4/1	0-2(8)	5	4,8	5,7	16	2,4	32,2	1,6
Kh-22-4/2	2(8)-10(19)	5	4,6	6,5	17,8	3,2	35,2	5
Kh-22-4/3	10--37	27,5	4,9	7,3	18	3,1	34,6	1,8
Kh-22-4/4	10(19)-37	5	5	5,2	15	2,5	24,6	5
Kh-22-4/5	37+	29,8	4,8	6,6	15,8	2,8	28,6	1,4
Kh-22-5/1	0-10	34	4,5	8,4	49,8	4,5	76,9	3,2
Kh-22-5/2	10--44	76,5	7,8	3,4	35,1	9,6	37,5	1,6
Kh-22-5/3	44-66	3,4	2,5	7,8	78,4	2,3	28,7	6,4
Kh-22-5/4	66-100	87	9,8	2,3	52,9	7,2	75,3	5,3
Kh-22-5/5	100-145	4,5	5,6	2,6	38,5	1,8	86,3	5,8
Kh-22-6/1	0-1	5	4,8	6,2	17,8	2,9	37,3	1,6
Kh-22-6/2	1--16	5	4,8	6,7	16,7	2,9	30,8	1,5
Kh-22-6/3	16+	5	4,8	2,3	2	0,4	2,6	4,5

Kh-22-7/1	0-3(7)	5	4,8	6,5	17,2	2,6	41,2	1,3
Kh-22-7/2	3(7)-11(18)	5	4,8	6	16,7	2,8	32,6	1,9
Kh-22-7/3	11(18)-70(72)	5	4,8	6,8	17,5	3	22,7	1,4
Kh-22-7/4	70(72)+	34,5	4,8	6,9	18,2	2,2	41,3	1,8
Kh-22-8/1	0--2	5	4,8	0,4	1,1	1,1	1,2	8,5
Kh-22-8/2	2--11	5	4,8	5	1,6	5	5	4,2
Kh-22-8/3	11-21(23)	5	4,8	6,9	17,7	2,7	38,5	1,7
Kh-22-8/4	21(23)-27	5	4,8	6,2	19,4	2,9	37,8	1,7
Kh-22-8/5	27-31	5	4,8	6,5	16,9	2,5	38,3	1,7
Kh-22-8/6	31-45	5	4,8	5	15,2	2,3	27,5	5
Kh-22-8/7	45+	5	4,8	5	0,9	0,9	1,1	9,6
Kh-22-9/1	0-0,5	5	4,8	5	15,2	2,3	27,5	5
Kh-22-9/2	0,5-20	5	4,8	2	4,1	1,7	4,5	5
Kh-22-9/3	20+	5	4,8	4,3	11,4	1,6	18,3	5
Kh-22-10/1	0--12	5	4,8	4,9	14,5	2,3	40,3	1,3
Kh-22-10/2	12+	5	4,8	4	11,2	1,7	33,1	1,7

3.4. Радиальная дифференциация криогенных почв УНП Хановой

Радиальная дифференциация концентраций химических элементов в почвах УНП Хановой представляет собой разнообразные картины профильных распределений, среди которых выделяются следующие основные закономерности, встречаемые наиболее часто: 1) обогащение большей части криогенных сезонно-талых горизонтов почв (Gcf@, CG@, CRg, CRM) многими элементами, концентрация элементов с переменной степенью окисления (Fe, Mn) и некоторых других в глеевых горизонтах, либо в горизонтах, проявляющих признаки оглеения (G, CRg, O/Cg, Gox и др.), а также относительно равномерные распределения концентраций большей части элементов в минеральных горизонтах почв без визуально выраженных признаков криогенеза.

Накопление макро- и микроэлементов в поверхностных торфяных горизонтах почв, скорее всего, связано с атмосферным поступлением содержащих их частиц на поверхность почв в результате длительного переноса промышленных выбросов крупных городов (Воркута и её города-спутники) в составе воздушных масс. Заметно, что торфяные горизонты (Т) более высокой мощности обладают повышенной способностью к аккумуляции элементов, по сравнению с горизонтами подстилок (О). В то время как

значения коэффициентов R для горизонтов подстилок чаще всего примерно сопоставимо с почвообразующей породой или даже демонстрирует рассеяние ($1 \geq R$) (рис. 6а, в, г, е, ж), то в торфяных горизонтах зачастую наблюдаются примерно двух- и более кратные превышения концентраций Al, Si, Ti, Mn, Sr, Y и Zr в горизонтах Т относительно С ($R \geq 2$).

По-видимому, процессы криогенного оструктурирования в горизонтах почв CR и CRM и параллельно развивающейся в ней в период промерзания восстановительной обстановки (морфологические признаки которой сохраняются в почвах и в период талого состояния), способствуют накоплению в них таких элементов, как Mn ($R_{Mn} = 2,1$) (рис. 6в), Al ($R_{Al} = 2,3$), Ti ($R_{Ti} = 8,9$) (рис. 6е), Rb, Sr и др. Многолетнемерзлые горизонты почв редко создают контрасты профильных распределений ввиду того, что надмерзлотные горизонты (CGcf@, CG@, Gox), проявляющие функции радиальных геохимических барьеров по отношению к Si, Ti, V, Sr, Zr и др. металлам, способствуют замедлению вертикальной миграции веществ на пути от поверхности почвы к верхней границе ММП.



Рис. 6. Радиальная дифференциация криогенных почв УНП Хановей: а) криозём криогенно-ожелезнённый поверхностно- и надмерзлотно-глеевый тиксотропный, б) торфяно-глеезём криогенно-ожелезнённый, в) криозём глеевый тиксотропный, г) криозём глееватый на древнеаллювиальных отложениях, д) торфяная олиготрофная почва, е) криометаморфическая глееватая, ж) криометаморфическая надмерзлотно-глееватая, з) торфяно-глеезём окисленно-глеевый мерзлотный, и) аллювиальная гумусовая почва, к) серогумусовая грубогумусированная почва на валунисто-галечниковом аллювии; 1 – сезонно-талые горизонты; 2 – криогенные сезонно-талые

горизонты; 3 – многолетнемёрзлые горизонты

3.5. Латеральная дифференциация криогенных почв УНП Хановой

В качестве латеральных геохимических барьеров на пути субгоризонтальной водной миграции веществ в почвенно-геохимических катенах на УНП Хановой чаще всего выступают сезонно-талые органогенные горизонты ($L_{Ti} = 2,6$, $L_{Al} = 1,3$, $L_V = 8,2$ и т.п.) мощного торфяника (Э_2 геохимический ландшафт) (рис. 7). Также весьма контрастными распределениями характеризуются концентрации Mn и Fe в группе геохимических ландшафтов первой надпойменной террасы, что, предположительно, связано с развитой здесь глеевой обстановкой в торфяно-глеезёмах и криозёмах криогенно-ожелезнённых, глееватых и глеевых, а резкий рост содержаний Ti, V и Sr ($L = 1,7-2,9$), возможно объяснить, наоборот, аэрацией почвенного профиля более лёгкого (песчаного) гранулометрического состава и, соответственного, окислительной средой, развитой здесь. Таки образом, мобилизованные при восстановлении в верхней части катены соединения элементов здесь иммобилизуются при впадении в осадок в результате окисления (рис. 7).

В криогенных сезонно-талых горизонтах латеральная дифференциация слабоконтрастна у большей части элементов. Исключение составляет повышенное значение коэффициента $L_V = 3$ в ландшафтах склона второй надпойменной террасы. Мы связываем это проявление со сменой литологического состава почвообразующих пород с торфяных отложений на покровные суглинки.

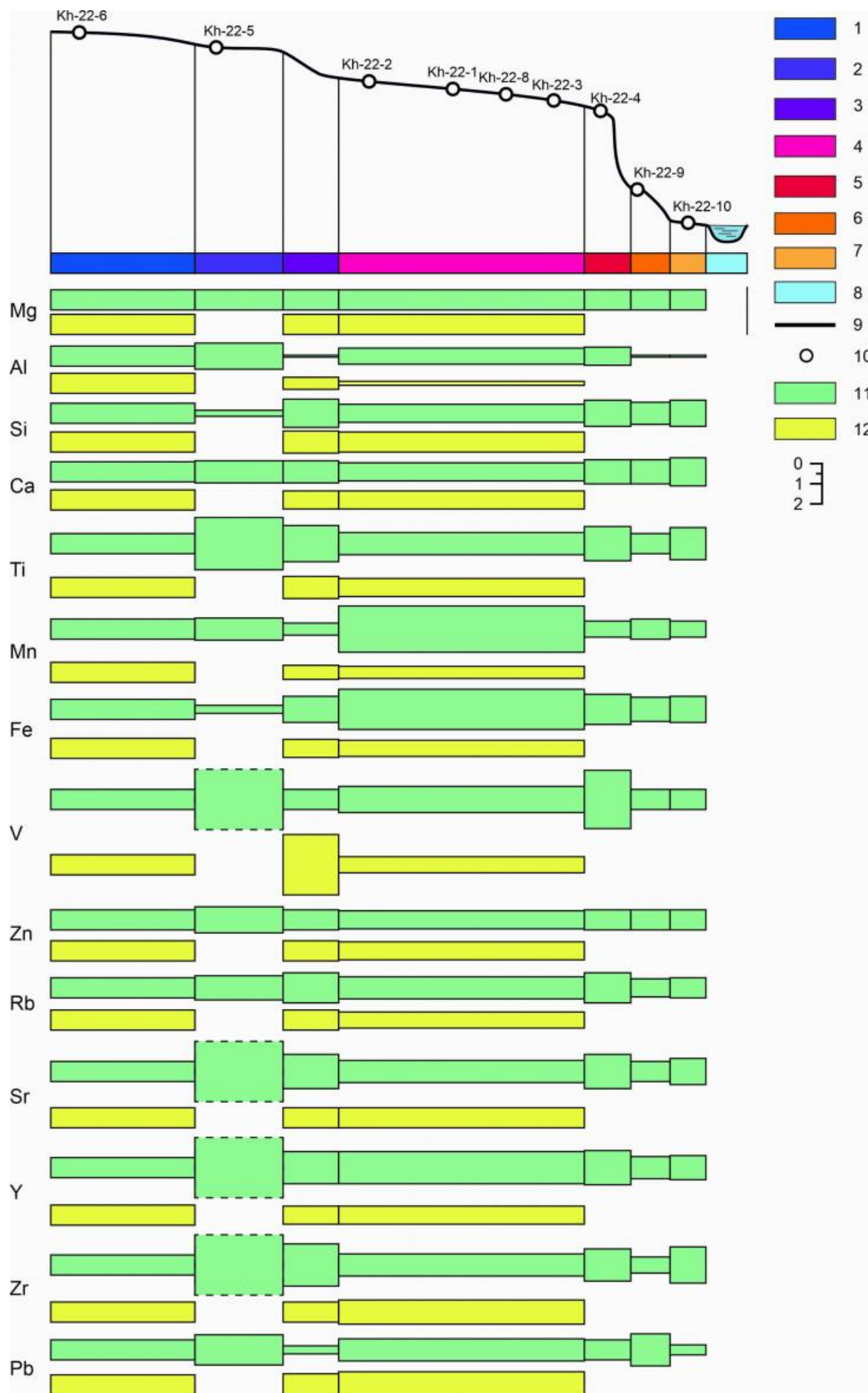


Рис. 7. Латеральная дифференциация химического состава криогенных почв УНП Хановей. Элементарные геохимические ландшафты: 1 – элювиальный первого порядка

(Э_{1R}); 2 – элювиальный второго порядка (Э₂); 3 – трансэлювиальный со слабым выносом (ТЭ₁); 4 – элювиальный второго порядка (Э₂); 5 – трансэлювиальный с активным выносом (ТЭ₃); 6 – трансэлювиально-аккумулятивный (ТЭА); 7 – супераквальный транзитный (СТ₃); 8 – аквальный (А). Прочие обозначения: 9 – профиль рельефа; 10 – местоположения почвенных разрезов; 11 – сезонно-талые горизонты; 12 – криогенные сезонно-талые горизонты

4. Дискуссия

4.1. Радиальные распределения

Верхние горизонты почв обладают повышенной депонирующей способностью по отношению к Fe и Mn (содержание подвижных форм Fe = $176 \pm 72,2$; Mn = $13,5 \pm 8,5$, что в 1,5–9 раз выше в горизонтах A0, A, по сравнению с горизонтом Bm) и относительно низкой – к Ca и Mg (в 2,5–3 раза выше содержание в горизонтах Bm, по сравнению с A0, A), что наблюдалось Д.С. Скрыбиной в мерзлотных почвах Якутии.^[21] Аналогичные наблюдения о концентрации железа и марганца в органогенных горизонтах почв УНП Хановой были сделаны как нами, так и другими исследователями в Большеземельской тундре.^[20] На юго-востоке Большеземельской тундры многие микроэлементы отличаются выносом из поверхностных органогенных горизонтов и зоны аэрации с накоплением на верхней границе глеевого горизонта: Cu (увеличение от 4–6 до 14 мг/кг), Pb (от 6 – 8 до 9 мг/кг), Cd (от 0,17 до 0,24 мг/кг), Zn (от 25 до 40 мг/кг), Co (от 4,2 до 10,2 мг/кг) и т.д.^[24] В почвах Большеземельской тундры профильное распределение концентраций микроэлементов отличается следующими чертами: As – распределён равномерно в горизонтах с высокими содержаниями Сорг и окислительной средой (в районе 1–2 мг/кг), а в глеевых горизонтах он накапливается, Pb и Cu распределены в профилях почв относительно равномерно, а Zn характеризуется, напротив, биогенной аккумуляцией, что выражается в накоплении этого металла в верхних горизонтах почв.^[10]

4.2. Латеральные распределения

М.П. Тентюковым^[22] были определены следующие статистические параметры распределения элементов-примесей (микроэлементов) в почвах двух основных типов ландшафтов южной части Большеземельской тундры – озёрно-болотных равнин и эрозионно-аккумулятивных равнин (табл. 7). В автоморфных почвах эрозионно-аккумулятивных равнин профильные распределения микроэлементов в почвах довольно контрастны с накоплением Zr, V и Ti в средней части профиля, а Mn аккумулируется в органогенных горизонтах. Первое явление, скорее всего, связано с элювиальным процессом, второе – с биогенной аккумуляцией. Многие элементы накапливаются на верхней границе тиксотропного горизонта в результате осаждения гидроксидами Fe и частичной сорбцией глинистыми частицами. Таким образом, отмечается совокупное влияние этих двух факторов на профильное распределение.

Таблица 7. Статистические параметры распределения элементов-примесей в ландшафтах южной подзоны Большеземельской тундры, г/т (по ^[22])

Элементы	Озёрно-болотные равнины (ландшафты многоозерья), n = 826				Эрозионно-аккумулятивные равнины, n = 375			
	О1	Me	О3	КК	О1	Me	О3	КК

I. Типичные катионогенные элементы-литофилы								
Sr	178	278	464	1,0	158,5	251	316	0,9
II. Элементы-литофилы с постоянной валентностью								
Y	10	35,9	59	1,2	6,3	10	15,8	0,3
III. Элементы-литофилы с переменной валентностью								
Ti	3160	7700	10000	2,3	630	1000	3160	0,3
Zr	100	166	278	1,0	39,8	63,1	15,8	0,4
V	77,4	110,2	1,66	1,2	7,9	31,6	50,1	0,3
IV. Металлы-сульфофилы								
Zn	77,4	166	215	3,9	31,6	50,1	100	1,2
Pb	10	16,7	21,5	1,4	6,3	10	31,6	0,8
V. Металлы-сидерофилы								
Mn	278,3	464,2	774	0,6	100	199	501	0,2

Примечание: Q1 – первый квартиль (25%), Me – медианное значение, Q3 – третий квартиль (75%), КК – кларк концентрации

Немного иное распределение наблюдается в профиле поверхностно-глеевых почв в трансэлювиальном геохимическом ландшафте склона. Слабовыраженный тиксотропный горизонт в средней части почвенного профиля, в котором проявляется признак процесса криогенного ожелезнения, отмечается накопление Mn и Zr. В трансаккумулятивном ландшафте аллювиальная дерново-глеевая почва отличается относительно слабым накоплением Ti и Zr в глеевом горизонте G [\[22, 23\]](#).

В тундровых почвах проявляется наибольшая контрастность латеральных геохимических барьеров по отношению к Fe, Mg, Pb, Sr и другим металлам. Особенно контрастны геохимические барьеры в подчинённых геохимических ландшафтах. [\[20\]](#)

5. Заключение

Изучены криогенные почвы на учебно-научном полигоне Хановей, расположенном в 30 км южнее г. Воркуты в Республики Коми. Физико-географически исследованный район относится к юго-западной части Большеземельской тундры и почвы данного района были классифицированы как криозёмы, торфяно-глеезёмы, криометаморфические, аллювиальные и серогумусовые. В них чаще других проявляются признаки криогенного ожелезнения, оглеения и т.п. процессов. Почвы относятся к кислым и близким к нейтральным по кислотности реакции, содержание водорастворимых солей в них чаще всего не превышает 100 мг/л, содержание Сорг достигает 45%, поскольку торфоаккумуляция здесь крайне активна. По гранулометрическому составу горизонты почвы варьируют от песчаных до тяжелосуглинистых и легкосуглинистых, резкая смена гранулометрического состава почвообразующих пород происходит при переходе от поверхности первой надпойменной террасы р. Воркуты к её склону. Валовой состав железа представлен в основном группой силикатных соединений, несиликатная фракция достигает концентраций в районе 2%, а аморфная фракция вообще малочисленна.

Среди картин радиальной дифференциации концентраций химических элементов в почвах УНП Хановей выделяются следующие: 1) большая часть криогенных сезонно-талых горизонтов почв обогащена многими элементами, 2) концентрация элементов с переменной степенью окисления в глеевых горизонтах, 3) относительно равномерные распределения концентраций в минеральных горизонтах почв без признаков криогенеза. Торфяные горизонты (Т) более высокой мощности обладают повышенной способности к

аккумуляции элементов, по сравнению с горизонтами подстилок (О). R для горизонтов подстилок чаще всего сопоставимы с почвообразующей породой или даже демонстрирует рассеяние. Процессы криогенного оструктурирования в горизонтах почв CR и CRM и параллельно развивающейся в ней восстановительной обстановки способствуют накоплению в них Mn ($R_{Mn} = 2,1$), Al ($R_{Al} = 2,3$), Ti ($R_{Ti} = 8,9$), Rb, Sr и др.

В качестве латеральных геохимических барьеров в почвенно-геохимических катенах выступают сезонно-талые органогенные горизонты ($L_{Ti} = 2,6$, $L_{Al} = 1,3$, $L_V = 8,2$ и т.п.) мощного торфяника (Σ_2 геохимический ландшафт). Также весьма контрастными распределениями характеризуются Mn и Fe в ландшафтах первой надпойменной террасы, а резкий рост содержаний Ti, V и Sr ($L = 1,7-2,9$) в них, наоборот, связан с аэрацией почвенного профиля песчаного гранулометрического состава. В криогенных сезонно-талых горизонтах латеральная дифференциация слабоконтрастна у большей части элементов.

Подробно изучена почвенно-геохимическая структура южнотундровых ландшафтов юго-востока Большеземельской тундры в долине р. Воркуты. Эти данные позволяют уточнить особенности функционирования геохимических ландшафтов ряда районов Российской Арктики и Субарктики.

Библиография

1. Атлас почв Республики Коми / Под ред. Г.В. Добровольского, А.И. Таскаева, И.В. Забоевой. – Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография», 2010. 356 с. + илл. карты.
2. Богданова М.Д., Гаврилова И.П., Герасимова М.И. Элементарные ландшафты как объекты ландшафтно-геохимического картографирования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2012. №1. С. 23 – 28.
3. Буданцева Н.А., Горшков Е.И., Исаев В.С., Семенков И.Н., Усов А.Н., Чижова Ю.Н., Васильчук Ю.К. Инженерно-геологические и геохимические особенности бугристых ландшафтов в районе учебно-научного полигона «Хановей» // Инженерная геология, 2015. №3. С. 34 – 50.
4. Васильчук Ю.К. Современное положение южной границы зоны многолетнемёрзлых пород Западно-Сибирской низменности // Криосфера Земли, 2013. Т. XVII, №1. С. 17 – 27.
5. Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П., Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю. Криогенные почвы на учебном полигоне Хановей, Воркутинский район, Республика Коми // Арктика и Антарктика, 2022. №3. С. 92 – 126. DOI: 10.7256/2453-8922.2022.3.39001
6. Геоботаническое районирование Нечерноземья европейской части РСФСР. Л.: Наука. 1989. 64 с.
7. Геокриология СССР. Европейская территория СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1988. – 357 с.
8. Геологические и геоморфологические карты / Б.И. Гуслицер, В.А. Разницын, М.В. Фишман, Г.А. Чернов // Атлас Коми АССР. – М.: 1964. С. 9 – 18.
9. Девятова Э.И. О краевых образованиях Валдайского ледника на территории Архангельской области // Труды комиссии по изучению четвертичного периода, вып. 21. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 5 – 15.
10. Дымов А.А., Лаптева Е.М., Калашников А.В., Денева С.В. Фоновое содержание тяжёлых металлов, мышьяка и углеводородов в почвах Большеземельской тундры // Теоретическая и прикладная экология, 2010. №4. С. 43 – 48.

11. Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
12. Климат Воркуты: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/23226.htm> (дата обращения 21.03.2023).
13. Леса Республики Коми / Г.М. Кобузов, А.И. Таскаев, С.В. Дегтева и др. – М.: Дизайн. Информация. Картография. 1999. 332 с.
14. Осадчая Д.Г. Особенности ландшафтной индикации геокриологических условий в большеземельской тундре // Материалы XII международной ландшафтной конференции «Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития» (Тюмень-Тобольск, 22 – 25 августа 2017 г.). – Изд-во Тюменского государственного университета, 2017. Т. 2. С. 389 – 391.
15. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высш. шк., 1975. 394 с.
16. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель, 1999. 764 с.
17. Полевой определитель почв. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. – 182 с.
18. Растительность европейской части СССР / Под ред. С.А. Грибовой, Т.И. Исаченко, Е.М. Лавренко. – Л. Наука, 1980. 429 с.
19. Семенов И.Н. Формы нахождения металлов в суглинистых тундровых, таёжных, подтаёжных и лесостепных почвенно-геохимических катенах / Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата географических наук. – М.: 2016а. 24 с.
20. Семенов И.Н., Касимов Н.С., Терская Е.В. Латеральное распределение форм металлов в тундровых, таёжных и лесостепных катенах восточно-европейской равнины // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 5. География, 2016б. №3. С. 29 – 39.
21. Скрыбина Д.С. Состояние соединений железа в мерзлотно-таёжных почвах / Диссертация на соискание учёной степени кандидата биологических наук // ФГБУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева. М.: 2016. 224 с.
22. Тентюков М.П. Геохимия ландшафтов равнинных тундр (на примере Ямала и Большеземельской тундры). – Сыктывкар, 2010. – 260 с.
23. Тентюков М.П. Особенности распределения химических элементов в мёрзлых почвах // Криосфера Земли, 2013. Т. XVII, №3. С. 100 – 107.
24. Шахтарова О.В. Микроэлементы в структурных компонентах почв юго-востока Большеземельской тундры // Материалы XXIII Всероссийской молодёжной научной конференции (с элементами научной школы) «Актуальные проблемы экологии и биологии» (Сыктывкар, 04 – 08 апреля 2016 г.). Институт биологии Коми Научного Центра УрО РАН, 2016. С. 133 – 138.
25. Oberman N.G., Mazhitova G.G. Permafrost dynamics in the Northeast European Russia based on the period of climatic warming 1970 – 1975 // Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography, 2001. Vol. 55. No 4. P. 241 – 244. DOI: 10.1080/00291950152746595

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, геохимический состав криогенных почв его пространственная дифференциация на примере учебно-научного полигона Хановой в Большеземельской тундре.

Методология исследования, в статье указана характеристика полигона, исходя из анализа статьи можно сделать вывод о использовании методов анализа проб в химико-аналитической лаборатории эколого-геохимического центра (ЭГЦ) географического факультета МГУ (г. Москва) аналитические показатели почв: кислотность водной вытяжки (рН), общее содержание легкорастворимых солей (TDS), общее содержание органического углерода (Сорг.), гранулометрический состав почв, концентрации несиликатного (Fенс) и оксалоторастворимого (Fеа) железа в почвах, а также валовое содержание макро- и микроэлементов., а также анализ литературных данных.

Актуальность затронутой темы безусловна и состоит в получении информации о таяние многолетнемёрзлых пород в результате климатических изменений особенно ярко проявляется в районе южной границы криолитозоны, увеличение мощности сезонно-талого слоя почв из года в год способствует росту глубины протекания активной миграции химических веществ и снижению контрастности профильных распределений содержания химических элементов. Это позволяет выявить последствия для изменения погодно-климатических условий.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований сделать вывод об комплексного изучения многолетнемёрзлых пород. Это является важным направлением в развитии геоэкологии.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим физико-химические свойства криогенных почв разной фракции. Автором были классифицированы почвы данного района как криозёмы, торфяно-глеезёмы, криометаморфические, аллювиальные и серогумусовые, подробно рассмотрен элементный состав криогенных почв, радиальная и латеральная дифференциация химического состава криогенных почв, определены статистические параметры распределения примесей микроэлементов, что делает представленные автором статьи результаты весьма интересными.

Однако есть ряд вопросов, в частности:

Автору статьи следовало бы выделить разделы статьи для лучшего восприятия целевую установку и задачи исследования.

Автору следуют проверить стилистические и орфографические неточности (например: «Эти данные позволяют уточнить особенности функционирования...»).

Из приведенных автором направлений следует отметить особенно интересный кроме изучения особенностей функционирования геохимических ландшафтов ряда районов Российской Арктики и Субарктики следует обратить внимание на скорость миграции и объем геохимических процессов на процессы изменения почвы на фон изменений климатических условий.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на методические рекомендации и технологические особенности анализа почв и грунтов.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволившие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.

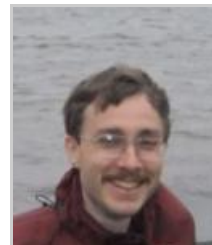
Англоязычные метаданные

Investigation of the Spatio-Temporal Heterogeneity of Snow Thickness at the Meteorological Site of the Lomonosov MSU in the Winter of 2022/2023

Frolov Denis Maksimovich

Scientific Associate, Faculty of Geography, M. V. Lomonosov Moscow State University
119991, Russia, g. Moscow, ul. Leninskie Gory, 1, of. 1904B

✉ denisfrolov@mail.ru



Seliverstov Yurii Germanovich

scientific coworker, Geographical faculty of Lomonosov Moscow State University
119991, Russia, Moscow, Leninskie Gory str., 1, office 1904B

✉ yus5@yandex.ru



Sokratov Sergei Al'fredovich

PhD in Geography

Associate Professor, Department of Cryolithology and Glaciology, Lomonosov Moscow State University
119991, Russia, Moscow, Leninskie Gory str., 1

✉ sokratov@geogr.msu.ru



Koshurnikov Andrei Viktorovich

PhD in Geology and Mineralogy

Leading Scientific Associate, Department of Geocryology, M. V. Lomonosov Moscow State University
119234, Russia, Moscow, Leninskie Gory str., 1, office 205

✉ koshurnikov@msu-geophysics.ru

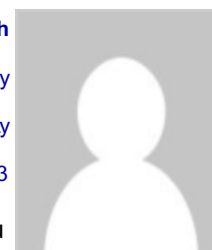


Gagarin Vladimir Evgen'evich

PhD in Geology and Mineralogy

Scientific Associate, Department of Geocryology, M. V. Lomonosov Moscow State University
119234, Russia, Moscow, Leninskie Gory str., 1, room C23

✉ gagar88@yandex.ru



Abstract. This paper presents the results of field studies conducted at the MSU meteorological site for the winter period of 2022/2023. The purpose of the observations was to study the development of the snow column and its spatial variability in one winter season. Field research consisted of analyzing stratigraphic layers of snow and measuring their density. The data obtained made it possible to characterize and evaluate changes in snow layers, structure, and density in spatiotemporal terms. The results of the work are displayed on the graphs of the spatial and temporal variability of the snow cover for 2022/2023. The evolution of the snow column over the winter period is analyzed. The analysis of observations reflects a high spatial and temporal variability of snow cover in winter, which allows not only to evaluate and compare the data obtained with past studies but also to supplement and improve the

already available information on the heterogeneity of snow cover.

Keywords: heterogeneity of snow cover, research, winter period, snow layer, winter season, weather site, MSU, snow thickness, spatio-temporal heterogeneities, snow cover

References (transliterated)

1. Golubev V.N., Petrushina M.N., Frolov D.M. Zakonomernosti formirovaniya stratigrafii snezhnogo pokrova // *Led i sneg*. — 2010. — № 1. — S. 58–72.
2. Golubev V. N., Frolov D. M. Osobennosti migratsii vodyanogo para na granitsakh razdela atmosfera–snezhnyi pokrov i snezhnyi pokrov–podstilayushchii grunt // *Kriosfera Zemli*. — 2015. — T. 19, № 1. — S. 22–29
3. Komarov A. Yu. i dr. Prostranstvenno-vremennaya neodnorodnost' snezhnoi tolshchi po dannym penetrometra SnowMicroPen // *Led i Sneg*. – 2018. – T. 58. – №. 4. S. 473–485.
4. Otchet ob izmenenii klimata v RF za 2022 god.
5. Firts Sh. i dr. Mezhdunarodnaya klassifikatsiya dlya sezonno vypadayushchego snega (rukovodstvo k opisaniyu snezhnoi tolshchi i snezhnogo pokrova). – 2012.
6. Frolov D. M. i dr. Izuchenie prostranstvenno-vremennoi neodnorodnosti snezhnoi tolshchi na ploshchadke MO MGU zimoi 2018/2019 gg. // *Ekologo-klimaticheskie kharakteristiki atmosfery Moskvy v 2018 g. po dannym Meteorologicheskoi observatorii MGU imeni MV Lomonosova*. – 2019. – S. 225–230.

The History of Geocryological Study of the Coastal-Shelf Zone of the Laptev and East Siberian Seas in the 1950s–1980s

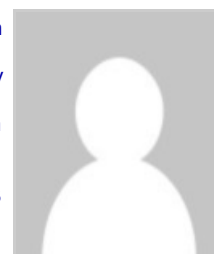
Suleimanov Aleksandr Albertovich

PhD in History

Senior Researcher, Institute of Humanitarian Studies and Problems of Small Peoples of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

677027, Russia, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Petrovsky str., 1, room 403

✉ alexas1306@gmail.com



Abstract. The historical analysis of the studies carried out during the 1950s–1980s by the staff of the Yakutsk Permafrost Research Station of the Obruchev Permafrost Institute of the USSR Academy of Sciences and since 1962 – organized on its basis by the Permafrost Institute of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences and aimed at studying the coastal-shelf zone of the Laptev Sea and the East Siberian Sea. The sources for the preparation of the article were the archival materials identified by the author from the funds of the Russian State Archive of Economics and the Archive of the Melnikov Permafrost Institute of SB RAS, as well as scientific literature data. The work carried out made it possible to show the significant activity of researchers in the study of subbottom permafrost. Its drivers were both purely cognitive interest and the needs of the industrial development of high latitudes. In the course of the surveys carried out, data were obtained characterizing the prevalence and thickness of subpermafrost, its temperature regime, composition and other properties.

Keywords: subbottom permafrost, geocryology, the USSR Academy of Sciences, scientific research, history of science, shelf of the Arctic seas, East Siberian Sea, Laptev Sea, Yakutia, Arctic

References (transliterated)

1. Akademicheskoe merzlotovedenie v Yakutii / Otv. red. R.M. Kamenskii. – Yakutsk: IMZ SO RAN, 1997. – 328 s.
2. Akademicheskaya nauka v Yakutii (1949–2009 gg.) / Gl. red. A.F. Safronov, otv. red. V.V. Shepelev. – Novosibirsk: Geo, 2009. – 220 s.
3. Arkhiv Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova Sibirskogo otdeleniya (IMZ SO) RAN. D. 553. 20 l.
4. Arkhiv IMZ SO RAN. D. 720. 540 l.
5. Arkhiv IMZ SO RAN. D. 829. 371 l.
6. Arkhiv IMZ SO RAN. D. 1368. 108 l.
7. Arkhiv IMZ SO RAN. D. 1402. 54 l.
8. Arkhiv IMZ SO RAN. D. 1482. 151 l.
9. Arkhiv IMZ SO RAN. D. 1623. 420 l.
10. Arkhiv IMZ SO RAN. D. 1657. 261 l.
11. Volkov A.V. Gornodobyvayushchaya promyshlennost' arkticheskoi Yakutii // Portal o razviti Arktiki. Rezhim dostupa: <https://goarctic.ru/politics/gornodobyvayushchaya-promyshlennost-arkticheskoy-yakutii/> (data obrashcheniya: 10.02.2023)
12. Grigor'ev M.N. Grigor'ev Nikolai Filippovich. Seriya «Uchenye-merzlotovedy». – Yakutsk: Izd-vo IMZ SO RAN, 2000. – 63 s.
13. Grigor'ev M.N. Kriomorfogenez i litodinamika pribrezhno-shel'fovoi zony morei Vostochnoi Sibiri: dis. ... d-ra geogr. nauk. – Yakutsk: IMZ, 2008. – 291 s.
14. Institut merzlotovedeniya im. V.A. Obrucheva AN SSSR: 1939–1963 / Otv. red. V.P. Mel'nikov, V.V. Baulin. – Novosibirsk: Geo, 2007. – 193 s.
15. Kaminskii V.D., Ivanov V.L. Rol' NIIGA-VNIIOkeangeologiya v polyarnoi i morskoi geologicheskoi nauke // 70 let v Arktike, Antarktike i Mirovom okeane. Sbornik nauchnykh trudov. – SPb.: VNIIOkeangeologiya, 2018. – S. 3–18.
16. Klimovskii I.V. Akademik Pavel Ivanovich Mel'nikov. – Novosibirsk: Geo, 2008. – 305 s.
17. Klimovskii I.V., Mandarov A.A. Are Feliks Ernestovich (k 75-letiyu so dnya rozhdeniya // Kriosfera Zemli. – 2002. – № 3. – S. 100–101.
18. Kupershtokh N.A. Razrabotka i realizatsiya sotsial'no-ekonomicheskikh proektov kompleksnoi programmy «Sibir» v 1980-1990-e gg. // Istoriko-ekonomicheskie issledovaniya. – 2018. – №4. – S. 514–528. DOI 10.17150/2308-2588.2018.19(4).514-528.
19. Rossiiskii gosudarstvennyi arkhiv ekonomiki (RGAE). F. 82. Op. 2. D. 605. 21 l.
20. RGAE. F. 82. Op. 2. D. 633. 20 l.
21. RGAE. F. 82. Op. 2. D. 716. 27 l.
22. Suleimanov A.A. Issledovaniya Severnoi ekspeditsii Instituta merzlotovedeniya SO AN SSSR 1962–1963 gg. v arkticheskikh raionakh Yakutii // Severo-Vostochnyi gumanitarnyi vestnik. – 2021. – № 3. – S. 57–67. – DOI 10.25693/SVG.2021.36.3.006.

Gas-saturated frozen rocks as an object of geocryology study

PhD in Geology and Mineralogy

Leading Scientific Associate, the Institute of Geoecology of the Russian Academy of Sciences

101000, Russia, Moscow oblast', g. Moscow, ul. Ulanskii Proezd, 13, stroenie 2

✉ a_khimenkov@mail.ru

**Koshurnikov Andrei Viktorovich**

PhD in Geology and Mineralogy

Leading Scientific Associate, Faculty of Geology, Department of Geocryology, M. V. Lomonosov Moscow State University

✉ msu-geophysics@mail.ru

Dernova Elena Olegovna

Researcher, Institute of Geoecology RAS

101000, Russia, Moscow, Ulansky Pereulok str., 13 building 2

✉ dernova.eo@gmail.com



Abstract. The subject of the study of the proposed article is the gas component of the cryolithozone. If the solid and liquid phases of frozen rocks have been studied sufficiently deeply and systematically, then the gas component has been studied weakly and fragmentally. The object of the study is gas-saturated frozen soils, their spatial distribution and properties. Studies of recent decades have shown that the gas component plays a significant role in the structure and properties of frozen rocks. The author examines in detail such aspects of the topic as the effect of gas on the physical and mechanical properties of both thawed and frozen soils. Special attention is paid to the overlap of capillaries in the soil with gas, an increase in pore pressure, a weakening of soil consolidation and connections between soil particles. This, in turn, is expressed in a decrease in strength and density while increasing compressibility and porosity. The novelty of the study lies in the fact that for the first time a comparative analysis of data on the content of the gas component of the pressure in it and the processes occurring in frozen rocks was carried out. A special contribution of the author to the study of the topic is that the influence of free gas on their physical and mechanical properties is shown. The relevance of the topic under consideration is due to the need to study the patterns of deformation of frozen rocks depending on the degree of gas saturation. The article analyzes the state of the regulatory framework that takes into account the influence of gases on strength and deformative properties. Their almost complete absence was recorded. The importance of taking into account the possible increased pressure in gas-saturated frozen rocks in the development of research methods and regulatory documents for their use in engineering-geological and design work is shown. The materials considered indicate that gas-saturated frozen soils are a significant and important part of the cryolithozone and their study should be carried out within the framework of an independent section of geocryology.

Keywords: gas hydrate decomposition, gas saturated soils, pneumatic rupture, gas hydrates, pressure filtration of gas, breaking strain, plastic deformation, gas filtration, permafrost, fracturing

References (transliterated)

1. Tsytoich N. A. Mekhanika merzlykh gruntov / Uchebn. posobie. M.: Vysshaya.shkola, 1973.
2. Kal'bergenov R.G., Karpenko V.S., V.N. Kutergin, R.V. Sobin R.V. Vliyanie gazovoi komponenty na svoistva merzlykh gruntov i dinamika ee vydeleniya pri izmenenii temperatury // Materialy 5-i konferentsii Den' nauki, M.:Dobrosvet. 2020. S. 10-17.
3. Karpenko F.S., Kutergin V.N., Kotov P.I., R. Sobin R.V. Dinamika vydeleniya gaza iz merzlykh gruntov pri izmenenii temperatury i davleniya // Stroitel'stvo na mnogoletnemerzlykh gruntakh. 2020. №4. S. 15-20.
4. Karpenko F.S., Kutergin V.N., Frolov S.I., R. Sobin R.V. Vliyanie na prochnost' glinistykh gruntov izmenenii svoistv gidratnykh plenok pri temperaturnykh vozddeistviyakh // Geoekologiya. 2021. № 1. S. 70-79.
5. Khimenkov A.N., Koshurnikov A. V., Sobolev P. A. Fil'tratsii gaza v merzlykh gruntakh // VESTNIK MOSKOVSKOGO UNIVERSITETA. SERIYa 4. GEOLOGIYa 2020. №. 3. S. 97–103.
6. Sergienko V. I., Lobkovskii L. I., Semiletov I.P. i dr. Degradatsiya podvodnoi merzloty i razrushenie gidratov na shel'fe Vostochno-arkticheskikh morei kak potentsial'naya prichina metanovoi katastrofy: nekotorye rezul'taty kompleksnykh issledovaniy 2011 goda // DAN. 2012. T. 446. № 1. S. 1132–1137.
7. Are F.E. Problema emissii glubinykh gazov v atmosferu // Kriosfera Zemli. 1998. T. II. № 4. S. 42-50.
8. Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdenii poluostrova Yamal. T.2. Kriosfera Bovanenkovskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya / Pod obshch. red. Yu.B. Badu, N.A. Gafarova, E.E. Podbornogo.M.: Gazprom Ekspo, 2013.
9. Mel'nikov P.I., Mel'nikov V.P., Tsarev V.P., Degtyarev B.V. i dr. O generatsii uglevodorodov v tolshchakh mnogoletnemerzlykh porod // Izvestiya AN SSSR, Seriya geologicheskaya. 1989. № 2. S.118-128.
10. Yakushev V. S., Basniev K. S., Adzynova F.A., Gryaznova I.V., . Voronova V.V Priznaki nalichiya regional'no gazonosnogo gorizonta novogo tipa na severe Zapadnoi Sibiri // Neftyanoe khozyaistvo 2014. №11. S. 100-101.
11. Bogoyavlenskii V.I., Garagash I.A. Obosnovanie protsessa obrazovaniya kraterovgazovogo vybrosa v Arktike matematicheskim modelirovaniem // Arktika: ekologiya i ekonomika. 2015. № 3. S. 12–17.
12. Leibman M. O., Kizyakov A. I. Novyi prirodnyi fenomen v zone vechnoi merzloty // Priroda. 2016. № 2. S. 15–24,
13. Khimenkov A.N., Stanilovskaya Yu.V. Fenomenologicheskaya model' formirovaniya voronok gazovogo vybrosa na primere Yamal'skogo kratera. // Arktika i Antarktika. 2018. № 3. S.1-25. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27524.
14. Bembel' R.M., Bembel' S.R., Kashin A.E., Laskovets E.B. Svyaz' ochagov aktivnogo neftegazonakopleniya i glubinykh kriogenykh istochnikov / Itogi fundamental'nykh issledovaniy kriosfery Zemli v Arktike i Subarktike. Novosibirsk. Nauka. 1997. S. 193–199.
15. Vasil'chuk Yu.K. Izotopnye metody v geografii. / Chast' 2: Geokhimiya stabil'nykh izotopov plastovykh l'dov. Tom II. M.: Izd-vo MGU, 2014.
16. Badu Yu.B. KRIOGENNAYa TOLShchA GAZONOSNYKh STRUKTUR YaMALA. O vliyanii gazovykh zalezhei na formirovanie i razvitie kriogennoi tolshchi / M.: Nauchnyi mir, 2018.
17. Romanovskii N. N. Osnovy kriogeneza litosfery: Uchebnoe posobie. / M.: Izd-vo MGU, 1993.

18. Chuvilin E.M., Kozlova E.V., Kudashov V.A., Petrakova S.Yu. Otsenka metastabil'nosti merzlykh gidratosoderzhashchikh porod. // Materialy tret'ei konferentsii geokriologov Rossii. Tom 1. Fiziko-khimiya, teplofizika i mekhanika merzlykh gruntov. M. 2005. S.292-299.
19. Yakushev V.S. Prirodnyi gaz i gazovye gidraty v kriolitozone. / M.: VNIIGAZ. 2009.
20. Istomin V. A., Chuvilin E.M., Sergeeva D. V., Bukhanov B. A. i dr. Vliyanie komponentnogo sostava i davleniya gaza na l'do- i gidratoobrazovanie v gazonasyshchennykh porovykh rastvorakh // NefteGazoKhimiya. 2018. № 2. S. 33-42.
21. Glagolev M.V., Kleptsova I.E. K voprosu o mekhanizme vykhoda puzyr'kov metana iz torfyanika // DOSiGIK. 2012. T. 3. № 3. C. 54-63.
22. Krasnov I.I. Gazy chetvertichnoi tolshchi predglintovoi polosy Leningradskoi oblasti // Prirodnye gazy SSSR. M.- L.: ONTI NKTP SSSR. 1935.
23. Yan-Li Li, Chun-Ming Lin (2010). Exploration methods for late Quaternary shallow biogenic gas reservoirs in the Hangzhou Bay area, eastern China. AAPG Bulletin, 94(11), 1741–1759. doi:10.1306/06301009184
24. Portnov A.D., Semenov P.B., Rekant P.V. Kompleks vysokochastotnykh seismoakusticheskikh issledovaniy i morskoi gazo-geokhimicheskoi s'emki kak metod obnaruzheniya i lokalizatsii uglevodorodov // Geologiya morei i okeanov: KhIKh Mezhdunar. nauchnoi konf. (shkoly) po morskoi geologii. 2011. T.II. M.: IO RAN, S. 97-100.
25. Obzhairov A.I. Gazogeokhimicheskie polya pridonnogo sloya morei i okeanov. M.: Nauka, 1993.
26. Obzhairov A. I., Telegin Yu.A., Okulov A.K. Gazogeokhimicheskie polya i raspredelenie prirodnikh gazov v dal'nevostochnykh moryakh // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2018. № 1. S. 66-74.
27. Mironyuk S. G., Otto V. P. Gazonasyshchennyye morskyye grunty i estestvennyye gazovydeleniya uglevodorodov: zakonomernosti rasprostraneniya i opasnost' dlya inzhenernykh sooruzhenii // Georisk, 2014. №2. S. 8-18.
28. Yakushev V.S. MEKkHANIZMY KONTSENTRATsII PRIRODNOGO GAZA V KRIOLITOZONE // Aktual'nye problemy nefti i gaza. 2018. №4. S. 1-4.
29. Kraev G.N., Rivkina E.M. Nakoplenie metana v promerzayushchikh i merzlykh pochvakh kriolitozony // Arctic Environmental Research. 2017. № 3. S. 173-184.
30. Kraev G, Schulze E-D, Yurova A, Kholodov A, Chuvilin E, Rivkina E Cryogenic Displacement and Accumulation of Biogenic Methane in Frozen Soils // Atmosphere. 2017.
31. Khimenkov A.N., Vlasov A.N., Brushkov A.V., Koshurnikov A.V. i dr. Geosistemy gazonasyshchennykh mnogoletnemerzlykh porod. M.: Geoinfo, 2021.
32. Vasil'ev A.A., Streletskaya I.D., Mel'nikov V.P., Oblogov G.E. Metan v podzemnykh l'dakh i merzlykh chetvertichnykh otlozheniyakh Zapadnogo Yamala // DAN. 2015. № 5. S.604–607.
33. Cherbunina M. Y., Shmelev D. G., Karaevskaya E. S. Methane content and its relationship with the microbial community of the upper layers of permafrost in central Yakutia // Innovation in Geology, Geophysics and Geography-2017. Pero Moscow, 2017. P. 25–26.
34. Gresov A. I., Yatsuk A. V. Gazovaya zonal'nost' i gazonosnost' mnogoletnemerzlykh otlozhenii uglenosnykh basseinov Vostochnoi Arktiki i prilgayushchikh regionov //Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya. 2013. №. 5. S.

387-398.

35. Zakharenko B.C., Shlykova V.V., Tarasov G.A. Osobennosti formirovaniya gazogidratov na kontinental'noi okraine Zapadnogo Shpitsbergena // Razvedka i okhrana nedr. 2010. № 8. S. 6-9.
36. Kurasov I. A., Stupakova A. V. Tektonicheskoe stroenie severnoi chasti Zapadno-Sibirskogo neftegazonosnogo basseina // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya. 2014. № 4. S. 56-64.
37. Are F. E., Borovikova N. V., Slepyshev V. N. Kriopeci v nizov'yakh r. Yuribei na Yamale // Lineinye sooruzheniya na vechnomerzlykh gruntakh. M. Nauka. 1990. S 60-67.
38. Bondarev V.L., Mirotvorskii M.Yu., Zvereva V.B., Oblekov G.I., i dr. Gazokhimicheskaya kharakteristika nadsenomanskikh otlozhenii poluostrova Yamal (na primere Bovanenkovskogo neftegazokondensatnogo mestorodzhdeniya) // Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii, 2008. № 5. S.22-34.
39. Chuvilin E.M., Yakushev V.S., Perlova E.V. Gas hydrates in the permafrost of Bovanenkovo gas field, Yamal Peninsula, West Siberia // Polarforschung, 2000, vol. 68, r. 215-219.
40. Chuvilin E.M., Davletshina D.A. Formation and accumulation of pore methane hydrates in permafrost: experimental modeling // Geosciences, 2018, vol. 8, No. 12, r. 467. doi.org/10.3390/geosciences8120467.
41. Bondarev V. L., Mirotvorskii M. Yu., Oblekov G. I., Shaidullin R. M., Gudzen V. T. Geokhimicheskie metody pri obnaruzhenii i lokalizatsii zalezhei uglevodorodnykh gazov (UVG) v nadproduktivnykh otlozheniyakh gazokondensatnykh mestorozhdenii p-va Yamal // Geologiya, geofizika razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii. № 11. 2005. S. 17-22.
42. Durmish'yan A G. Znachenie anomal'no vysokikh plastovykh davlenii pri poiske gazovykh i gazokondensatnykh zalezhei // Gazovaya promyshlennost'. 1961. № 7. S. 1-3.
43. Rokos S.I. Inzhenerno-geologicheskie osobennosti pripoverkhnostnykh zon anomal'no vysokogo plastovogo davleniya na shel'fe Pechorskogo i yuzhnoi chasti Karskogo morei // Inzhenernaya geologiya. 2008. № 4. S. 22-28.
44. Anderson, A. L., Abegg, F., Hawkins, J. A., Duncan, M. E., and Lyons, A. P., 1998. Bubble populations and acoustic interaction with the gassy floor of Eckernforde Bay. " Continental Shelf Research, 18, 1807-38. doi:10.1016/S0278-4343(98)00059-4
45. Tokarev M.Yu., Poludetkina E.N., Starovoitov A.V., Pirogova A.S., Korost S.R., Oshkin A.N., Potemka A.K. Kharakteristika gazonasyshchennykh otlozhenii Kandalakshskogo zaliva Belogo morya po dannym seismoakusticheskikh i litologo-geokhimicheskikh issledovaniy // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya. 2019. № 1. S. 107-114.
46. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment / Cambridge University Press, New York 2007.
47. Buldovich S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y ., Ospennikov E.N., Vorobyev S.A., Gunar A.Y ., Gorshkov E.I., Chuvilin E.M., Cherbunina M.Y ., Kotov P.I., Lubnina N.V., Motenko R.G., Amanzhurov R.M. Supplementary Materials for Cryovolcanism on the earth: Origin of a spectacular crater in the yamal peninsula (Russia) // Scientific reports. 2018. Vol. 8. • DOI: 10.1038/s41598-018-31858-9
48. Titovskii A.L., Pushkarev V.A., Sinitskii A.I., Baryshnikov A.V. YaMAL"SKIE KRATERY: ISSLEDOVANIYA GEOLOGICHESKOGO FENOMENA // NAUCHNYI VESTNIK Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga 2018. № 3. Salekhard. 2018. S.68-75.

49. Bogoyavlenskii V.I. Vybrosoy gaza i nefti na sushe i akvatoriyakh Arktiki i Mirovogo okeana // BURENIE I NEFT". 2015. № 6. S. 4-10.
50. Mackay J. R. PINGO GROW TH AND COLLAPSE, TUKTOYAKTUK PENINSULA AREA, W ESTERN ARCTIC COAST, CANADA: ALONG-TERM FIELD STUDY // Géographie physique et Quaternaire. 1998, vol. 52. R. 1- 53.
51. Buldovich S., Khilimonyuk V., Bychkov A., Ospennikov E., et al. Cryogenic hypothesis of the Yamal crater origin Results of detailed studies and modeling // Proc. 5th European Conference On Permafrost. Book of Abstracts, 23 June - 1 July 2018a, Chamonix, France. P. 97-98.
52. Stroenie i svoistva porod kriolitozony yuzhnoi chasti Bovanenkovskogo gazokondensatnogo metorozhdeniya. / Otv. red. Chuvilin E. M. M.: GEOS, 2007.
53. Shchelokova D. V. NETRADITSIONNYE UGLEVODORODY KAK ISTOCHNIK NEISCHERPAEMOSTI TOPLIVNO-ENERGETICHESKIKh RESURSOV // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov 2016. №1. S. 120-126.
54. Ershov E.D., Chuvilin E. M., Naletov N.S., Smirnova, O.G. Povedenie ionov khimicheskikh elementov v promerzayushchikh dispersnykh porodakh // Teplomassoobmen MMF 96: Minsk 1996. T. 7. S. 16-20.
55. Chuvilin E., Ekimova V., Bukhanov B., Grebenkin S., et al. Role of Salt Migration in Destabilization of Intra Permafrost Hydrates in the Arctic Shelf: Experimental Modeling // Geosciences. 2019. V. 9(4). doi.org/10.3390/geosciences9040188/
56. Tsytoich N. A. Mekhanika merzlykh gruntov. / M.:Vysshaya shkola. 1973.
57. Aref'ev S .P., Khomutov A.V., Ermokhina K.A., Leibman M.O.Dendrokronologicheskaya rekonstruktsiya protsessa formirovaniya gazovogo bugra na meste Yamal'skoi voronki // Kriosfera Zemli. 2017. № 5. S. 107—119.
58. Kizyakov A., Leibman M., Zimin M., Sonyushkin A., Dvornikov Y., Khomutov A., Dhont D., Cauquil E, Pushkarev V., Stanilovskaya Y. Gas Emission Craters and Mound-Predecessors in the North of West Siberia, Similarities and Differences // Remote Sens. 2020, 12, 2182; 23 p. doi:10.3390/rs12142182
59. Chuvilin E., Stanilovskaya J., Titovsky A., Sinitsky A., Sokolova N., Bukhanov B., Spasennykh M., Cheremisin A., Grebenkin S., Davletshina D and Christian Badetz A Gas-Emission Crater in the Erkuta River Valley,Yamal Peninsula: Characteristics and Potential Formation Model // Geosciences 2020. 10 (170) 16 p. doi:10.3390/geosciences10050170
60. Danilov I.D. Podzemnye l'dy. / M.: Nedra, 1990.
61. Ershov E.D. Obshchaya geokriologiya. / M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2002.
62. Karpenkoa F. S., Kutergina V. N., Dernovaa E. O., and Osokina A. A. // WATER RESOURCES Vol. 49 Suppl. 2 2022 pp. 69-75
63. Lenchenko N.N. Dinamika podzemnykh vod. / M. MGGU. 2004.
64. Gol'dberg V. M., Skvortsov N. P. Pronitsaemost' i fil'tratsiya v glinakh / M.: Nedra, 1986.
65. Shiyun Lei, Xiujun Guo, Haoru Tang1 Experiment and analysis of the formation, expansion and dissipation of gasbag in fine sediments based on pore water pressuresurvey // Acta Oceanol. Sin., 2022, Vol. 41, No. 4, P. 91–100
66. Chuvilin E. M., Perlova E. V., Yakushev V. S. Klassifikatsiya gazovogo komponenta porod kriolitozony // Kriosfera Zemli. 2005. №3. S. 73-76.
67. Sergeev i dr. Gruntovedenie. / M.: Izd-vo MGU. 1983.

68. Gassmann F. Elastic waves through a packing of spheres. *Geophysics.*, vol. 16, No. 4, 1954.
69. Gassmann F. Über die Elastizität Poröser Medien. *Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik*, No. 17, 1951, pp. 1–23.
70. *Teoreticheskie osnovy inzhenernoi geologii. Fiziko-khimicheskie osnovy*. Pod redaktsiei Sergeeva E. M. // Nedra, 1985.
71. Tsytovich N. A. *Mekhanika gruntov Uchebnoe posobie*. / M.: Stroizdat, 1963.
72. Tsytovich N. A. *Mekhanika gruntov (kratkii kurs): Uchebnik dlya stroitel'nykh vuzov*. / M. : Vysshaya shkola. 1983.
73. Roman L. T. *Mekhanika merzlykh gruntov*. / M.: MAIK «Nauka/Interperiodika». 2002.
74. Roman L. T., Merzlyakov V.P., Maleeva A.N. Vliyanie stepeni vodogazonasyshcheniya na temperaturnye deformatsii merzlykh gruntov. // *Kriosfera Zemli*, 2017. № 3. S. 24–31.
75. Mirzadzhanzade A. Kh., Khasanov M. M., Bakhtizin R. N. *Etyudy o modelirovanii slozhnykh sistem neftedobychi*. / Ufa: GILEM. 1999.
76. Mel'nikov I.V., Nersesov S.V., Osokin A.B., Nikolaichuk E.V. i dr. Geotekhnicheskie resheniya dlya stroitel'stva gazovykh skvazhin v osobo slozhnykh geokriologicheskikh usloviyakh poluoostrova Yamal // *Gazovaya promyshlennost'*. 2019. № 12. S 64-71.
77. SP 11-114-2004. «Inzhenernye izyskaniya na kontinental'nom shel'fe dlya stroitel'stva morskikh neftegazopromyslovykh sooruzhenii» / Gosstroi Rossii M.: FGUP PNIIS Gosstroya Rossii, 2004.
78. SP 11-102-97 «Inzhenerno-ekologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva»
79. Mashtakov A.S. Analiz kompleksnogo vliyaniya geologicheskikh protsessov i geodinamicheskikh vozdествii na nesushchuyu sposobnost' svainykh fundamentov neftyanykh platform, ustanavlivaemykh na shel'fe Kaspiiskogo morya // *Inzhenernaya geologiya*. 2014. №2. С. 44 – 53.

Lateral and Radial Differentiation of Cryogenic Soils Chemical Composition in the Vilyuy River valley, Central Yakutia

Vasil'chuk Yuriy Kirillovich 

Doctor of Geology and Mineralogy

Professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography

119991, Russia, Moscow, Leninskie Gory str., 1, of. 2009

✉ vasilch_geo@mail.ru

Ginzburg Alexander Pavlovich 

Engineer, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography

119991, Russia, Leninskie gory region, Leninskie Gory, Leninskie Gory str., 1, of. 2007

✉ alexandrginzburg13154@yandex.ru

Abstract. The subject of the study is the soil-geochemical features of cryogenic mid-taiga landscapes of the Vilyuy River valley in its middle course, located near Mahatta and the village of Kysyl-Syr of the Republic of Sakha (Yakutia). Morphological descriptions of soil profiles were compiled. Chemical and analytical laboratory work was carried out in order to establish the

values of the physico-chemical parameters of soil horizons - pH, the content of easily soluble salts, the content of organic carbon, granulometric composition, fractional composition of iron. The main aspect of the soil-geochemical properties of the landscapes of the middle Vilyui River is the gross chemical composition of cryogenic soils. The gross contents of chemical elements were determined by X-ray fluorescence using portable X-ray diffraction, after which the geochemical coefficients of radial (profile) and lateral (catenary) differentiation of concentrations of chemical elements R and were calculated. In automorphic soils, most of the chemical elements are removed from their surface organic horizons, and in mineral ones they are concentrated. Ca, Ti, Mn, Fe, Zn and Zr differ by the highest values of the coefficients R (R reaches 20). The radial differentiation is significantly influenced by acidity, organic carbon content and other soil properties, for example, the increased content of Si, Ca, V and Zn (R up to 1,3–3,7) relative to the horizon of soil parent rocks which is associated with the content of Sorghum. In terms of lateral differentiation, most of the studied elements are characterized by accumulation in the upper part of the soil-geochemical catena. The catenae Ca, Mn, Fe, Zn and Y are most widely distributed in soils ($LCa = 0.3\text{--}1.8$; $LMn = 0.1\text{--}2.0$; $LFe = 0.6\text{--}2.1$; $LZn = 0.9\text{--}2.9$ and $LY = 0.3\text{--}1.4$).

Keywords: Vilyui River, Central Yakutia, middle taiga, lateral differentiation, radial differentiation, concentrations of microelements, concentrations of macroelements, soil-geochemical catena, permafrost, cryogenic soils

References (transliterated)

1. Bogdanova M.D., Gavrilova I.P., Gerasimova M.I. Elementarnye landshafty kak ob'ekty landshaftno-geokhimicheskogo kartografirovaniya // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya. 2012. № 1. S. 23–28.
2. Varlamov S.P., Skryabin P.N. Dinamika teplovogo sostoyaniya gruntov merzlotnykh landshaftov Tsentral'noi Yakutii // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk, 2012. T. 14, № 1 (8). S. 2040–2044.
3. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk Dzh.Yu., Ginzburg A.P. Kriogennye pochvy v doline r. Vilyui, Yakutiya // Arktika i Antarktika. 2021. № 3. S. 80–105. doi: 10.7256/2453-8922.2021.3.36671.
4. Gabyshev V.A., Gabysheva O.I. Osobennosti razvitiya fitoplanktona i fiziko-khimicheskikh svoystv vody srednego i nizhnego Vilyuya i Svetlinskogo vodokhranilishcha // Ekologicheskaya otsenka i kartografirovanie. 2011. № 3. S. 45–54.
5. Gabysheva L.P. Kharakteristika osnovnykh lesov tukulanov Leno-Vilyuiskogo mezhdurech'ya // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2020. № 10. S. 7–13.
6. Gavril'ev P.P., Ugarov I.S., Efremov P.V. Kriogennye protsessy i izmenenie ustoichivosti porod ledovogo kompleksa v Tsentral'noi Yakutii pri sovremennoy izmenenii klimata i narushenii poverkhnosti // Nauka i obrazovanie. 2005. № 4 (40). S. 84–87.
7. Geokriologiya SSSR. Srednyaya Sibir' /pod red E.D. Ershova. – M.: Nedra, 1989. – 414 s.
8. Hidrogeologiya SSSR. T. XX. Yakutskaya ASSR. – M.: Nedra, 1970. – 383 s.
9. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossii (novaya seriya) v masshtabe 1:1 000 000. List P-50,51 (Olekminsk). Karta dochetvertichnykh obrazovaniy / Komitet po geologii i ispol'zovaniyu nedr pri pravitel'stve Rossiiskoi Federatsii (sostavlena v VSEGEI imeni A.P. Karpinskogo; avtory: Kovrigina E.K., Shtein L.F., Semenov Yu.G., Zarubin A.S., Semerikov A.A., Kamaletdinov V.A.; kartografy-sostaviteli: Sai T.S., Kruglova L.I.; redaktor: Kovrigina E.K.). Rosgeolkom, 1992.

10. Zakharova V.I., Nikiforova E.N. Flora i rastitel'nost' okrestnostei deflyatsionnogo ozera Byranattalakh (nizov'e r. Vilyui, Tsentral'naya Yakutiya) // Vestnik SVFU. 2016. № 1 (51). S. 5–14.
11. Ivanov V.A., Rozhin I.I. Modelirovanie degradatsii mnogoletnemerzlykh porod pri poteplenii klimata v usloviyakh Tsentral'noi Yakutii na blizhaishie 300 let // Sovremennye naukoemkie tekhnologii, 2021. № 10. S. 41–47.
12. Karta rasprostraneniya kriogennykh protsessov Respubliki Sakha (Yakutiya). Masshtab 1: 5 000 000 / Fedorov A.N., Torgovkin Ya.I., Shestakova A.A., Vasil'ev N.F., Kalinicheva S.V., Basharin N.I., Konstantinov P.Ya., Samsonova V.V.; gl. red. M.N. Zheleznyak – Yakutsk: IMZ SO RAN. 2018. 1 l.
13. Kasimov N.S., Lychagin M.Yu., Chalov S.R., Shinkareva G.L. Parageneticheskie assotsiatsii khimicheskikh elementov v landshaftakh // Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya. 2019. № 6. S. 20–27.
14. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii / Avtory i sostaviteli: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimova. – Smolensk: Oikumena, 2004. – 342 s.
15. Konishchev V.N. Reaktsiya vechnoi merzloty na poteplenie klimata // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya, 2009. № 4. S. 10–20.
16. Konishchev V.N., Rogov V.V. Vliyanie kriogeneza na glinistye mineraly // Kriosfera Zemli, 2008. T. XII, № 1. S. 51–58.
17. Kut' A.A. Eolovo-merzlotnye obrazovaniya (tukulany) Tsentral'noi Yakutii: stroenie, genezis, vozrast, zakonomernosti rasprostraneniya / Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk. Yakutsk. 2015. 23 s.
18. Lebedeva L.S., Efremov V.S., Khristoforov I.I., Bazhin K.I., Ogonerov V.V., Pavlova N.A. Taliki i formirovanie rechnogo stoka na malom vodosbore v sploshnoi kriolitozone Yakutii // Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Tret'i Vinogradovskie chteniya. Grani gidrologii» (Sankt-Peterburg, 28–30 marta 2018 g.). 2018. S. 62–66.
19. Merzlotno-landshaftnaya karta Respubliki Sakha (Yakutiya). Masshtab 1: 1 500 000 / Fedorov A.N., Torgovkin Ya.I., Shestakova A.A., Vasil'ev N.F., Makarov V.S. i dr.; gl. red. M.N. Zheleznyak – Yakutsk: IMZ SO RAN, 2018. 2 l.
20. Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Mnogoletnie dannye. Yakutskaya ASSR. L.: Gidrometeoizdat, 1989. Ser. 3. K. 1. Ch. 1-6. Vyp. 24. 606 s.
21. Natsional'nyi atlas Rossii. V chetyrekh tomakh [Karty] / redkol.: A.V. Borodko (pred.), V.V. Sveshnikov (gl. red.) i dr. – Moskva: Roskartografiya. 2004–2008.
22. Nikolaev A.N., Skachkov Yu.B. Vliyanie dinamiki snezhnogo pokrova na rost i razvitie lesov v tsentral'noi Yakutii // Kriosfera Zemli, 2011. T. XV. № 3. S. 71–80.
23. Nikolaev A.N., Ugarov I.S. Razlichiya rezhima uvlazhneniya merzlotnykh landshaftov Tsentral'noi Yakutii i ego vliyanie na rost listvennits // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk, 2011. T. 13, №1 (4). S. 1016–1019.
24. Nikolaeva N.A. Ustoichivost' landshaftov basseina r. Vilyui v Zapadnoi Yakutii // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya, 2020. № 11. S. 88–94.
25. Osnovy biogeokhimii: Ucheb. posobie dlya geogr., biol., geolog., s.-kh. spets. vuzov. – M.: Vyssh. shk. 1998. – 413 s.
26. Palamarchuk V.A., Lebedeva L.S., Baishev N.E. Rezul'taty rekognosti-sirovochnogo obsledovaniya istochnikov podzemnykh vod tukulana Makhatta // Sbornik dokladov Shestoi konferentsii geokriologov Rossii «Monitoring v kriolitozone» s uchastiem rossiiskikh i zarubezhnykh uchenykh, inzhenerov i spetsialistov. MGU imeni M.V. Lomonosova, 14-17 iyunya 2022 g. – M.: «KDU», «Dobrosvet», 2022.

27. Perel'man A.I. Geokhimiya landshafta. M.: Vyssh. shk. 1975. 394 s.
28. Perel'man A.I., Kasimov N.S. Geokhimiya landshafta. M.: Astreya. 1999. 764 s.
29. Permyakov P.P., Varlamov S.P., Skryabin P.N., Skachkov Yu.B. Chislennoe modelirovanie termicheskogo sostoyaniya kriolitozony v usloviyakh menyayushchegosya klimata // Nauka i obrazovanie. 2016. № 2. S. 43–48.
30. Polevoi opredelitel' pochv. – M.: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva. 2008. – 182 s.
31. Safronov A.F., Berzin A.G., Fradkin G.S. Tektonicheskaya priroda lokal'nykh podnyatii Vilyuiskoi sineklizy // Geologiya nefti i gaza, 2003. №4. S. 20 – 28.
32. Chevychelov A.P. Merzlotnye pochvy Tsentral'noi Yakutii: geografiya, genezis i raznoobrazie // Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 90-letiyu kafedry pochvovedeniya i ekologii pochv TGU «Otrazhenie bio-, geo-, antroposfernykh vzaimodeistvii v pochvakh i pochvennom pokrove» (Tomsk, 14–19 sentyabrya 2020 g.). Izdatel'skii dom TGU, 2020. S. 98–101.
33. Shofman I.L., Kind N.V., Pakhomov M.M., Prokopchuk B.I., Vinogradova S.N., Sulerzhitskii L.D., Forova V.S. Novye dannye o vozraste otlozhenii nizkikh terras v basseine r. Vilyui // Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda. №47 1977. S. 100–107.
34. Shesternev D.M. Fizicheskoe i khimicheskoe vyvetrивanie massivov gornykh porod v kriolitozone // Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. 2017. № 3. S. 350–360.
35. Shmelev D.G. Kriogenez rykhlykh otlozhenii polyarnykh oblastei Zemli / Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata geograficheskikh nauk. M.: MGU imeni M.V. Lomonosova, geograficheskii fakul'tet, 2015. 155 s.
36. Fedorova S., Kryzhanovsky A. Combined scheme of permafrost water purification in Central Yakutia // IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering, 2020. 953, 012025. 9 pp. doi:10.1088/1757-899X/953/1/012025.
37. The Far North: Plant biodiversity and Ecology of Yakutia. Plant and Vegetation 3. Springer Science + Business Media B.V., 2010. 390 p. doi: 10.1007/978-90-481-3774-9.
38. <http://pogodaiklimat.ru/history/24641.htm>

Lateral and radial differentiation of cryogenic soils geochemical composition in the Khanovei scientific and educational field site, Bolshezemel'skaya tundra

Vasil'chuk Yuriy Kirillovich 

Doctor of Geology and Mineralogy

Professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography

119991, Russia, Moscow, Leninskie Gory str., 1, of. 2009

✉ vasilch_geo@mail.ru

Ginzburg Alexander Pavlovich 

Engineer, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography

119991, Russia, Moscow, Leninskie Gory str., 1, office 2007

✉ alexandrginzburg13154@yandex.ru

Abstract. The subject of the study was the soil and geochemical features of southern tundra

cryogenic landscapes on the Khanovei educational and scientific field site located nearby the eponymous settlement in the Vorkuta district, Komi Republic. Morphology of soil profiles were described according to the modern Russian soil classification system. Chemical analytical sample treatment was done to evaluate such physical and chemical parameters of soil horizons as the pH rate, water-soluble salts content, organic carbon content, soil texture, iron fractional composition. The main point among soil and geochemical features of the Khanovei field site was gross chemical composition of cryogenic soils. Gross concentrations of chemicals were measured with the X-ray fluorescence method by portable X-ray Fluorescence Analyzer and then geochemical ratios of radial (profile) and lateral (catenar) differentiation of chemical elements – R and L. Largest R ratio meanings in soil profiles were in gleyic horizons including above-permafrost. Peat horizons without traces of soil mineral fraction were depleted with the most of elements ($R = 0,1-0,3$) and mineral horizons of soils were differed by increased RFe, RMn etc. The lower part of the catena with soils of mostly sandy texture was depleted by the main part of elements (Ti, Zn, Zr etc.) and predominantly loamy-textured soils in the upper part accumulate these elements and form increased L ratio meanings.

Keywords: Khanovei scientific and educational field site, Vorkuta area, tundra soils, Bolshezemelskaya tundra, radial differentiation, lateral differentiation, macro- and microelements, soil-geochemical catena, cryogenic soils, Republic of Komi

References (transliterated)

1. Atlas pochv Respubliki Komi / Pod red. G.V. Dobrovol'skogo, A.I. Taskaeva, I.V. Zaboevoi. – Syktyvkar: OOO «Komi respublikanskaya tipografiya», 2010. 356 s. + ill. karty.
2. Bogdanova M.D., Gavrilova I.P., Gerasimova M.I. Elementarnye landshafty kak ob'ekty landshaftno-geokhimicheskogo kartografirovaniya // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya, 2012. №1. S. 23 – 28.
3. Budantseva N.A., Gorshkov E.I., Isaev V.S., Semenov I.N., Usov A.N., Chizhova Yu.N., Vasil'chuk Yu.K. Inzhenerno-geologicheskie i geokhimicheskie osobennosti bugristykh landshaftov v raione uchebno-nauchnogo poligona «Khanovei» // Inzhenernaya geologiya, 2015. №3. S. 34 – 50.
4. Vasil'chuk Yu.K. Sovremennoe polozhenie yuzhnoi granitsy zony mnogoletnemerzlykh porod Zapadno-Sibirskoi nizmennosti // Kriosfera Zemli, 2013. T. XVII, №1. S. 17 – 27.
5. Vasil'chuk Yu.K., Ginzburg A.P., Budantseva N.A., Vasil'chuk Dzh.Yu. Kriogennyye pochvy na uchebnom poligone Khanovei, Vorkutinskii raion, Respublika Komi // Arktika i Antarktika, 2022. №3. S. 92 – 126. DOI: 10.7256/2453-8922.2022.3.39001
6. Geobotanicheskoe raionirovanie Nechernozem'ya evropeiskoi chasti RSFSR. L.: Nauka. 1989. 64 s.
7. Geokriologiya SSSR. Evropeiskaya territoriya SSSR / Pod red. E.D. Ershova. – M.: Nedra, 1988. – 357 s.
8. Geologicheskie i geomorfologicheskie karty / B.I. Guslitser, V.A. Raznitsyn, M.V. Fishman, G.A. Chernov // Atlas Komi ASSR. – M.: 1964. S. 9 – 18.
9. Devyatova E.I. O kraevykh obrazovaniyakh Valdaiskogo lednika na territorii Arkhangel'skoi oblasti // Trudy komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda, vyp. 21. – M.: Izd-vo AN SSSR, 1963. S. 5 – 15.
10. Dymov A.A., Lapteva E.M., Kalashnikov A.V., Deneva S.V. Fonovoe sodержanie tyazhelykh metallov, mysh'yaka i uglevodorodov v pochvakh Bol'shezemel'skoi tundry // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya, 2010. №4. S. 43 – 48.

11. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii / Avtory i sostaviteli: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimova. – Smolensk: Oikumena, 2004. – 342 s.
12. Klimat Vorkuty: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/23226.htm> (data obrashcheniya 21.03.2023).
13. Lesa Respubliki Komi / G.M. Kobuzov, A.I. Taskaev, S.V. Degteva i dr. – M.: Dizain. Informatsiya. Kartografiya. 1999. 332 s.
14. Osadchaya D.G. Osobennosti landshaftnoi indikatsii geokriologicheskikh uslovii v bol'shezemel'skoi tundre // Materialy XII mezhdunarodnoi landshaftnoi konferentsii «Landshaftovedenie: teoriya, metody, landshaftno-ekologicheskoe obespechenie prirodopol'zovaniya i ustoichivogo razvitiya» (Tyumen'-Tobol'sk, 22 – 25 avgusta 2017 g.). – Izd-vo Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2017. T. 2. S. 389 – 391.
15. Perel'man A.I. Geokhimiya landshafta. M.: Vyssh. shk., 1975. 394 s.
16. Perel'man A.I., Kasimov N.S. Geokhimiya landshafta. M.: Astreya, 1999. 764 s.
17. Polevoi opredelitel' pochv. – M.: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2008. – 182 s.
18. Rastitel'nost' evropeiskoi chasti SSSR / Pod red. S.A. Gribovoi, T.I. Isachenko, E.M. Lavrenko. – L. Nauka, 1980. 429 s.
19. Semenov I.N. Formy nakhozhdeniya metallov v suglinistykh tundrovnykh, taezhnykh, podtaezhnykh i lesostepnykh pochvenno-geokhimicheskikh katenakh / Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata geograficheskikh nauk. – M.: 2016a. 24 s.
20. Semenov I.N., Kasimov N.S., Terskaya E.V. Lateral'noe raspredelenie form metallov v tundrovnykh, taezhnykh i lesostepnykh katenakh vostochno-evropeiskoi ravniny // Vestn. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya, 2016b. №3. S. 29 – 39.
21. Skryabina D.S. Sostoyanie soedinenii zheleza v merzlotno-taezhnykh pochvakh / Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata biologicheskikh nauk // FGBU VO RGAU – MSKhA imeni K.A. Timiryazeva. M.: 2016. 224 s.
22. Tentyukov M.P. Geokhimiya landshaftov ravninnykh tundr (na primere Yamala i Bol'shezemel'skoi tundry). – Syktyvkar, 2010. – 260 s.
23. Tentyukov M.P. Osobennosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v merzlykh pochvakh // Kriosfera Zemli, 2013. T. XVII, №3. S. 100 – 107.
24. Shakhtarova O.V. Mikroelementy v strukturnykh komponentakh pochv yugo-vostoka Bol'shezemel'skoi tundry // Materialy XXIII Vserossiiskoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii (s elementami nauchnoi shkoly) «Aktual'nye problemy ekologii i biologii» (Syktyvkar, 04 – 08 aprelya 2016 g.). Institut biologii Komi Nauchnogo Tsentra UrO RAN, 2016. S. 133 – 138.
25. Oberman N.G., Mazhitova G.G. Permafrost dynamics in the Northeast European Russia based on the period of climatic warming 1970 – 1975 // Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography, 2001. Vol. 55. No 4. P. 241 – 244. DOI: 10.1080/00291950152746595