

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: 23-06-2025

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: 23-06-2025

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.

Геннадиев Александр Николаевич - доктор географических 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", кабинет 2009. alexagenna@mail.ru

Герасимова Мария Иннокентьевна, доктор биологических наук, профессор кафедры геохимии и ландшафтов и географии почв Географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. maria.i.gerasimova@gmail.com
119234, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, Главный корпус МГУ, сектор "А", ауд 2007. maria.i.gerasimova@gmail.com

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.

Gennadiev Alexander Nikolaevich, Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of Geochemistry and Landscapes and Soil Geography of the Faculty of Geography of the Lomonosov Moscow State University.

119234, Russia, Moscow, Leninskie Gory, 1, Moscow State University, Sector "A", Office 2009. alexagenna@mail.ru

Gerasimova Maria Innokentievna, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Geochemistry and Landscapes and Soil Geography of the Faculty of Geography of the Lomonosov Moscow State University. maria.i.gerasimova@gmail.com

119234, Russia, Moscow, Leninskie Gory, 1, Moscow State University, sector "A", room 2007. maria.i.gerasimova@gmail.com

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.

Цитирование или воспроизведение текста, созданного ChatGPT, в вашей статье

Если вы использовали ChatGPT или другие инструменты искусственного интеллекта в своем исследовании, опишите, как вы использовали этот инструмент, в разделе «Метод» или в аналогичном разделе вашей статьи. Для обзоров литературы или других видов эссе, ответов или рефератов вы можете описать, как вы использовали этот инструмент, во введении. В своем тексте предоставьте prompt - командный вопрос, который вы использовали, а затем любую часть соответствующего текста, который был создан в ответ.

К сожалению, результаты «чата» ChatGPT не могут быть получены другими читателями, и хотя невозстановимые данные или цитаты в статьях APA Style обычно цитируются как личные сообщения, текст, сгенерированный ChatGPT, не является сообщением от человека.

Таким образом, цитирование текста ChatGPT из сеанса чата больше похоже на совместное использование результатов алгоритма; таким образом, сделайте ссылку на автора алгоритма записи в списке литературы и приведите соответствующую цитату в тексте.

Пример:

На вопрос «Является ли деление правого полушария левого полушария реальным или метафорой?» текст, сгенерированный ChatGPT, показал, что, хотя два полушария мозга в некоторой степени специализированы, «обозначение, что люди могут быть охарактеризованы как «левополушарные» или «правополушарные», считается чрезмерным упрощением и популярным мифом» (OpenAI, 2023).

Ссылка в списке литературы

OpenAI. (2023). ChatGPT (версия от 14 марта) [большая языковая модель].
<https://chat.openai.com/chat>

Вы также можете поместить полный текст длинных ответов от ChatGPT в приложение к своей статье или в дополнительные онлайн-материалы, чтобы читатели имели доступ к точному тексту, который был сгенерирован. Особенно важно задокументировать точный созданный текст, потому что ChatGPT будет генерировать уникальный ответ в каждом сеансе чата, даже если будет предоставлен один и тот же командный вопрос. Если вы создаете приложения или дополнительные материалы, помните, что каждое из них должно быть упомянуто по крайней мере один раз в тексте вашей статьи в стиле APA.

Пример:

При получении дополнительной подсказки «Какое представление является более точным?» в тексте, сгенерированном ChatGPT, указано, что «разные области мозга работают вместе, чтобы поддерживать различные когнитивные процессы» и «функциональная специализация разных областей может меняться в зависимости от опыта и факторов окружающей среды» (OpenAI, 2023; см. Приложение А для полной расшифровки). .

Ссылка в списке литературы

OpenAI. (2023). ChatGPT (версия от 14 марта) [большая языковая модель].
<https://chat.openai.com/chat> Создание ссылки на ChatGPT или другие модели и программное обеспечение ИИ

Приведенные выше цитаты и ссылки в тексте адаптированы из шаблона ссылок на программное обеспечение в разделе 10.10 Руководства по публикациям (Американская психологическая ассоциация, 2020 г., глава 10). Хотя здесь мы фокусируемся на ChatGPT, поскольку эти рекомендации основаны на шаблоне программного обеспечения, их можно адаптировать для учета использования других больших языковых моделей (например, Bard), алгоритмов и аналогичного программного обеспечения.

Ссылки и цитаты в тексте для ChatGPT форматируются следующим образом:

OpenAI. (2023). ChatGPT (версия от 14 марта) [большая языковая модель].
<https://chat.openai.com/chat>

Цитата в скобках: (OpenAI, 2023)

Описательная цитата: OpenAI (2023)

Давайте разберем эту ссылку и посмотрим на четыре элемента (автор, дата, название и

источник):

Автор: Автор модели OpenAI.

Дата: Дата — это год версии, которую вы использовали. Следуя шаблону из Раздела 10.10, вам нужно указать только год, а не точную дату. Номер версии предоставляет конкретную информацию о дате, которая может понадобиться читателю.

Заголовок. Название модели — «ChatGPT», поэтому оно служит заголовком и выделено курсивом в ссылке, как показано в шаблоне. Хотя OpenAI маркирует уникальные итерации (например, ChatGPT-3, ChatGPT-4), они используют «ChatGPT» в качестве общего названия модели, а обновления обозначаются номерами версий.

Номер версии указан после названия в круглых скобках. Формат номера версии в справочниках ChatGPT включает дату, поскольку именно так OpenAI маркирует версии. Различные большие языковые модели или программное обеспечение могут использовать различную нумерацию версий; используйте номер версии в формате, предоставленном автором или издателем, который может представлять собой систему нумерации (например, Версия 2.0) или другие методы.

Текст в квадратных скобках используется в ссылках для дополнительных описаний, когда они необходимы, чтобы помочь читателю понять, что цитируется. Ссылки на ряд общих источников, таких как журнальные статьи и книги, не включают описания в квадратных скобках, но часто включают в себя вещи, не входящие в типичную рецензируемую систему. В случае ссылки на ChatGPT укажите дескриптор «Большая языковая модель» в квадратных скобках. OpenAI описывает ChatGPT-4 как «большую мультимодальную модель», поэтому вместо этого может быть предоставлено это описание, если вы используете ChatGPT-4. Для более поздних версий и программного обеспечения или моделей других компаний могут потребоваться другие описания в зависимости от того, как издатели описывают модель. Цель текста в квадратных скобках — кратко описать тип модели вашему читателю.

Источник: если имя издателя и имя автора совпадают, не повторяйте имя издателя в исходном элементе ссылки и переходите непосредственно к URL-адресу. Это относится к ChatGPT. URL-адрес ChatGPT: <https://chat.openai.com/chat>. Для других моделей или продуктов, для которых вы можете создать ссылку, используйте URL-адрес, который ведет как можно более напрямую к источнику (т. е. к странице, на которой вы можете получить доступ к модели, а не к домашней странице издателя).

Другие вопросы о цитировании ChatGPT

Вы могли заметить, с какой уверенностью ChatGPT описал идеи латерализации мозга и то, как работает мозг, не ссылаясь ни на какие источники. Я попросил список источников, подтверждающих эти утверждения, и ChatGPT предоставил пять ссылок, четыре из которых мне удалось найти в Интернете. Пятая, похоже, не настоящая статья; идентификатор цифрового объекта, указанный для этой ссылки, принадлежит другой статье, и мне не удалось найти ни одной статьи с указанием авторов, даты, названия и сведений об источнике, предоставленных ChatGPT. Авторам, использующим ChatGPT или аналогичные инструменты искусственного интеллекта для исследований, следует подумать о том, чтобы сделать эту проверку первоисточников стандартным процессом. Если источники являются реальными, точными и актуальными, может быть лучше прочитать эти первоисточники, чтобы извлечь уроки из этого исследования, и перефразировать или процитировать эти статьи, если применимо, чем использовать их интерпретацию модели.

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

Тао Д., Алексеев А.Г., Брушков А.В. Длительная ползучесть мерзлых грунтов в многолетних испытаниях	1
Качор О.Л., Паршин А.В., Трусова В.В., Курина А.В., Икрамов З.Л. Оценка качества атмосферного воздуха в районе будущего экотехнопарка "Восток" (г. Усолье-Сибирское, Иркутская область) по данным снегогеохимической съемки	15
Васильчук Ю.К. Концентрация основных растворимых ионов в ядре булгуньях на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха, юг Тазовского полуострова	35
Сулейманов А.А. Якутская комплексная экспедиция Академии наук СССР 1925–1930 гг. и вопросы изучения многолетнемерзлых пород	56
Ступин О.Г., Вахрушева И.А., Пчелинцева С.В., Красовская Л.В. Инженерно-геокриологическая оценка влияния добычи минерального сырья на деградацию многолетнемерзлых пород в пределах арктической криолитозоны России	69
Ли Ч., Брушков А.В., Чеверев В.Г., Ло Ю., Соколов А.В. Механизм выбросов метана при поверхностном замерзании осенью	83
Хименков А.Н., Станиловская Ю.В. Воронки газового выброса как объект геокриологии (Часть 1)	99
Харитонов А.Л. Прогнозные оценки углеводород-перспективных областей Антарктики по геофизическим данным, измеренным в пределах концентрических геоморфологических особенностей земной коры и ледникового покрова	117
Галкин А.Ф., Жирков А.Ф., Панков В.Ю. Ошибки линеаризации зависимости коэффициента теплопроводности снега от плотности	141
Англоязычные метаданные	150

Contents

Tao D., Alekseev A.G., Brushkov A.V. Long-term creep of frozen soils in multi-year tests	1
Kachor O.L., Parshin A.V., Trusova V.V., Kurina A.V., Ikramov Z.L. Assessment of air quality in the area of the future ecotechnopark "Vostok" (Usolye-Sibirskoye, Irkutsk region) based on snow geochemical survey data.	15
Vasil'chuk Y.K. The concentration of major soluble ions in the ice core of the pingo at the Pestsovoye gas field, in the Evoyakha River valley of southern Tazovsky Peninsula, Northwestern Siberia	35
Suleymanov A.A. Yakutsk Complex Expedition of the USSR Academy of Sciences 1925–1930 and Issues of Permafrost Studying	56
Stupin O.G., Vakhrusheva I.A., Pchelintseva S.V., Krasovskaya L.V. Engineering and geocryological assessment of the impact of mineral extraction on permafrost degradation within the Arctic cryolithozone of Russia	69
Li C., Brushkov A.V., Cheverev V.G., Lo Y., Sokolov A.V. The mechanism of methane emissions during surface freeze in autumn	83
Khimenkov A.N., Stanilovskaya J.V. Gas emission funnels as an object of geocryology (Part 1)	99
Kharitonov A.L. Forecast estimates of hydrocarbon potential areas of Antarctica based on geophysical data measured within the concentric geological-morphological features of the Earth's crust and glacial cover	117
Galkin A.F., Zhirkov A.F., Pankov V.Y. Errors in linearizing the dependence of the thermal conductivity coefficient of snow on density	141
Metadata in english	150

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Тао Д., Алексеев А.Г., Брушков А.В. Длительная ползучесть мерзлых грунтов в многолетних испытаниях //

Арктика и Антарктика. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.73912 EDN: XEZWSY URL:

https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=73912

Длительная ползучесть мерзлых грунтов в многолетних испытаниях

Тао Дачжи

аспирант; Геологический факультет, Московский государственный университет им. МВ. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, р-н Раменки, тер. Ленинские Горы, д. 1

✉ taoolga@yeah.net



Алексеев Андрей Григорьевич

доктор технических наук

Руководитель центра геокриологических и геотехнических исследований НИИОСП им. Н.М. Герсегонова

109428, Россия, г. Москва, Рязанский р-н, ул. 2-я Институтская, д. 6 стр. 12

✉ adr-alekseev@yandex.ru



Брушков Анатолий Викторович

доктор геолого-минералогических наук

Заведующий кафедрой геокриологии геологического факультета МГУ имени МВ. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, р-н Раменки, тер. Ленинские Горы, д. 1

✉ geocryology@mail.ru



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

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.2.73912

EDN:

XEZWSY

Дата направления статьи в редакцию:

27-03-2025

Дата публикации:

03-04-2025

Аннотация: Настоящее исследование посвящено длительной ползучести мерзлых засоленных грунтов (песка, супеси и суглинка) в условиях постоянных температур и механических нагрузок, образцы мерзлых грунтов отбирались из современных морских и аллювиальных четвертичных отложений в природных условиях на п-ве Ямал. Особое внимание уделено изучению динамики деформаций во времени при одноосном сжатии. Работа направлена на выявление закономерностей изменения скорости деформации, анализ стадии затухающей и незатухающей ползучести, а также на сопоставление экспериментальных данных с теоретическими моделями старения, упрочнения и течения. Эксперименты проводились в подземной лаборатории Амдерминской мерзлотной станции на глубине 14 м в течение до 9 лет, что позволило исследовать долгосрочное поведение мерзлых грунтов. Результаты имеют важное значение для прогноза устойчивости оснований зданий в условиях вечной мерзлоты и предотвращения их разрушений. Методом исследования являлось длительное лабораторное испытание образцов мерзлых грунтов методом одноосного сжатия при постоянной температуре и нагрузке. Научная новизна данного исследования заключается в продолжительности экспериментов (до 9 лет), что существенно превышает временные рамки большинства ранее проведённых испытаний. В большинстве известных исследований максимальная продолжительность ползучих испытаний мерзлых грунтов в различных режимах не превышала нескольких месяцев. Впервые на большом временном интервале показано, что для песков и супесей наблюдается переход от неустойчивой стадии деформации к стабильной, в то время как для суглинков выявлены нелинейные зависимости, предположительно связанные с трещинообразованием и изменением внутренней структуры. Использование математических моделей позволило уточнить параметры прогноза деформаций, что имеет прикладное значение для инженерных расчётов. Полученные результаты повышают достоверность оценки устойчивости фундаментов и обеспечивают научную основу для проектирования зданий и сооружений в районах вечной мерзлоты.

Ключевые слова:

ползучесть мерзлых грунтов, одноосное сжатие, теория, длительное испытание, деформация, вечная мерзлота, инженерная геокриология, адмерминская подземная лаборатория, сооружение, затухающая ползучесть

Введение

Изменение климата и повышение среднегодовых температур в холодных регионах мира привели к значительным изменениям в строении и свойствах вечной мерзлоты. Климатические изменения сопровождаются деградацией мерзлых грунтов, что ставит под угрозу устойчивость инженерных сооружений, таких как транспортные магистрали и здания, расположенные в районах вечной мерзлоты [\[1, 2, 3\]](#). Одной из основных проблем является ползучесть мерзлых грунтов — процесс длительных деформаций при постоянной нагрузке, который влияет на устойчивость оснований зданий и сооружений [\[4, 5\]](#).

Ползучесть мерзлых грунтов обусловлена рядом факторов: типом грунта, содержанием льда, влажностью, температурой и величиной нагрузки [\[6\]](#). Наличие микротрещин и ледяных шлиров в структуре мерзлых грунтов, а также зависимость ползучести от

температуры делают эти материалы сложным объектом для прогнозирования [7]. Экспериментальные данные показывают, что мерзлые грунты проявляют затухающую ползучесть, которая состоит из начальной неустойчивой и стабильной стадий, и незатухающую ползучесть, где появляется третья стадия - течения с прогрессирующей скоростью [8, 9, 10].

Изучение длительных деформационных процессов в мерзлых грунтах представляет собой одну из ключевых задач современной инженерной геокриологии. В свое время Н.А.Цытович обобщил многолетние результаты исследований, подчеркнув значимость длительных экспериментов для оценки поведения грунтов в вечномерзлых условиях [11]. Важные результаты были представлены в работе [10], где были проведены длительные эксперименты, выявившие нелинейные зависимости ползучести мерзлых грунтов от температуры и криогенного строения. Эти данные имеют ключевое значение для прогнозирования устойчивости оснований сооружений в условиях вечной мерзлоты.

Одной из важнейших проблем является длительность испытаний, так как предполагаемое затухание деформаций при компрессионном сжатии или одноосном (трехосном) сжатии, характерное для немерзлых грунтов, для мерзлых грунтов пока не имеет экспериментального обоснования. Есть вероятность того, что при длительной ползучести может происходить изменение скоростей деформаций, в том числе их увеличение, что имеет принципиальное значение для прогноза устойчивости фундаментов на мерзлых грунтах. К сожалению, максимальная длительность экспериментов по ползучести мерзлых грунтов в различных видах испытаний составляет не более первых месяцев [12], главным образом из-за трудностей поддержания постоянной температуры. Поэтому те редкие испытания, которые были сделаны, были проведены главным образом в России, в подземных лабораториях Игарки и Амдермы [13, 14]. Натурный эксперимент с полевым прессом был также сравнительно недавно проведен в Тибете [15]. В этом эксперименте со ступенчатыми нагрузками 0.09 МПа, 0.19 МПа and 0.29 МПа в течение 8 лет наблюдались затухающие деформации в условиях естественного температурного режима.

Существующие подходы к моделированию ползучести мерзлых грунтов можно разделить на эмпирические модели, построенные на основе регрессионного анализа [16], и реологические модели, описывающие поведение грунта через механические элементы, такие как пружины Гука и ньютоновские цилиндры [17]. Подчеркнем, что большинство исследований ползучести ограничивалось непродолжительными экспериментами (до нескольких месяцев), что создает трудности при прогнозировании длительных деформационных процессов.

В настоящем исследовании проведен анализ многолетних деформаций мерзлых грунтов (песка, супеси и суглинка) методом одноосного сжатия в экспериментах, проведенных в Амдерминской подземной лаборатории [13, 8]. Цель работы заключалась в изучении динамики изменения скорости деформации во времени, оценке стабильности деформаций грунтов и уточнении параметров используемых моделей ползучести, что имеет важное значение для проектирования и эксплуатации сооружений в условиях вечной мерзлоты. Как известно [8], засоленные мерзлые грунты имеют низкую прочность и отличаются высокими деформационными характеристиками, поэтому в настоящей работе исследовались мерзлые грунты, распространенные на Арктическом побережье.

Методика экспериментов

В экспериментах использовались засоленные мерзлые образцы нарушенного сложения. Образцы мерзлых грунтов отбирались из современных морских и аллювиальных четвертичных отложений в природных условиях на п-ве Ямал в соответствии с требованиями ГОСТ 12071-2014. Для получения образцов нарушенного сложения сухой грунт измельчался, смешивался с раствором морской соли заданной концентрации, чтобы достичь заданных значений засоленности и влажности. Процесс подготовки включал выдерживание образцов для равномерного распределения влаги в грунте в условиях эксикатора при положительной температуре, а также уплотнение образцов в обоймах с последующим промораживанием при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ для получения массивной криогенной текстуры. Промораживание осуществлялось в теплоизолированных контейнерах с односторонним охлаждением в течение 3–7 суток. После завершения процесса подготовки торцы образцов зачищались, фиксировались их размеры, масса, определялась льдистость. Для одноосного сжатия использовались цилиндрические образцы диаметром 45–50 мм и высотой 100 мм. До момента испытаний образцы хранились в подземной лаборатории камерах при температуре испытаний, обернутые в двойные полиэтиленовые оболочки, что предотвращало потерю влажности.

Испытания на одноосное сжатие проводились для определения характеристик ползучести мерзлых грунтов. Для испытаний использовались 18 образцов грунтов (песок, супесь и суглинок), из которых по 6 параллельных образцов предназначались для каждой серии опыта. Образцы закрепляли в приборе для одноосного сжатия. Применялись постоянные нагрузки для изучения длительных деформаций грунтов. Оборудование позволяло фиксировать осевые и поперечные деформации. Длительность экспериментов составляла до 10 лет. Испытания проводились в подземной лаборатории Амдерминской мерзлотной станции на глубине 14 м, что обеспечивало относительную стабильность температурных условий с колебаниями не более $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в конечный период наблюдений до $\pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Образцы помещались в тонкую резиновую оболочку и дополнительно в пластиковый стакан, частично наполненный снегом для предотвращения потери влаги. После испытаний проводились контрольные измерения, изменения льдистости образцов не зафиксировано. Физические свойства образцов приведены в табл. Полученные данные сопоставлялись с теоретическими моделями деформирования грунтов.

Таблица 1. Физические свойства засоленных мерзлых грунтов в длительных испытаниях

Грунт	T, $^{\circ}\text{C}$	Засоленность, Dsal, %	Влажность	Плотность, г/см ³
Песок	-3	0,1	0,26	1,91
Супесь	-3	0,2	0,38	1,75
Суглинок	-3	0,5	0,46	1,68

Результаты исследований

По полученным данным построены кривые длительного деформирования и скорости деформации для мерзлого морского песка, супеси и суглинка.

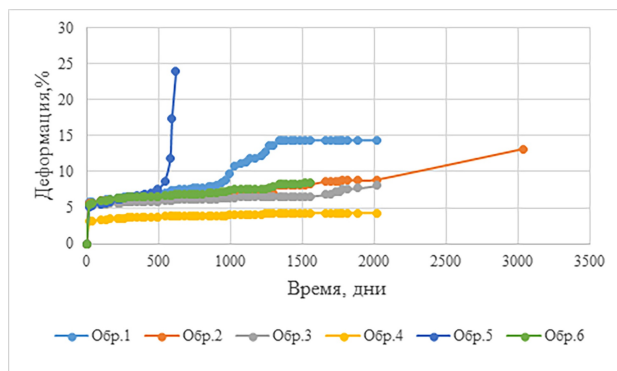


Рис.1. Кривые длительного деформирования мерзлого морского песка при засоленности 0,1%, плотность грунта 1,91 г/см³, плотность частиц 2,4 г/см³, влажность 0,26 и нагрузка 0,15 МПа. Температура -3°C, цифрами обозначены номера образцов

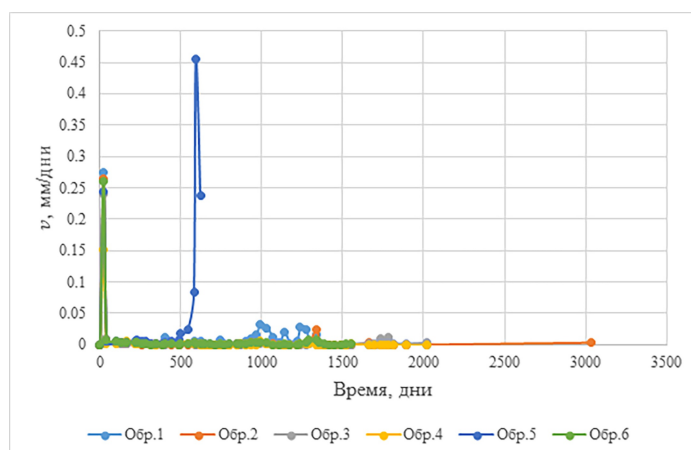


Рис.2. Кривые скорости деформации мерзлого песка. Температура -3°C, цифрами обозначены номера образцов

Длительная ползучесть засоленного мерзлого песка происходит с затухающей, постоянной и затем увеличивающейся во времени скоростью и заканчивается разрушением образцов, т.е. соответствует поведению мерзлых незасоленных образцов и результатам кратковременных испытаний (рис. 1). В отличие от мерзлых засоленных песков и мерзлых незасоленных пород засоленные глинистые мерзлые породы деформируются преимущественно с уменьшающейся скоростью - так же, как и в ранее проведенных кратковременных испытаниях [8].

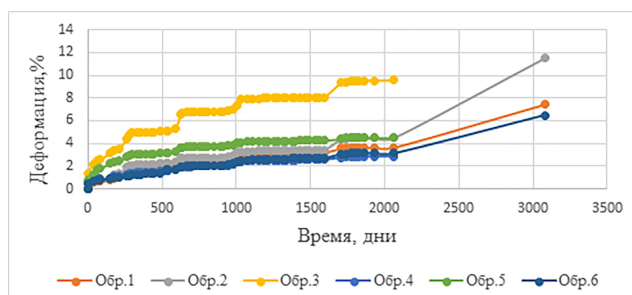


Рис.3. Кривые длительного деформирования мерзлой морской супеси при засоленности 0,2%, плотность грунта 1,75 г/см³, плотность частиц грунта 2,68 г/см³, влажность 0,38 и нагрузка 0,31 МПа. Температура -3°C, цифрами обозначены номера образцов

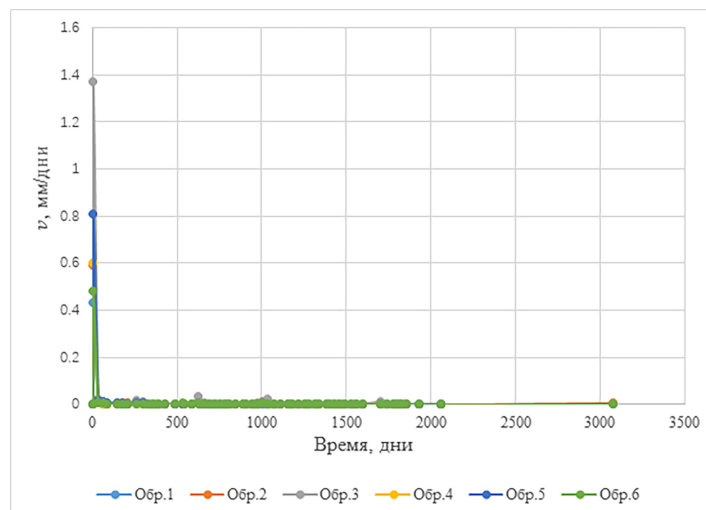


Рис.4. Кривые скорости деформации мерзлой супеси, цифрами обозначены номера образцов

Рис. 3 показывает, в процессе эксперимента происходит постепенное накопление деформации мерзлой супеси (засоленность 0,2%, влажность 0,38, плотность 1,75 г/см³) при температуре -3°C и нагрузке 0.31 МПа. На начальной стадии деформация увеличивается быстро, что связано, вероятно, с уплотнением структуры грунта и перераспределением напряжений. Со временем темпы деформации снижаются, что отражает переход к стадии стабилизации скорости ползучести. Скорость деформации изменяется нелинейно, что обусловлено, возможно, сложными процессами в структуре мерзлой супеси. Для отдельных образцов (например, образец 3) отмечаются резкие изменения скорости деформации, указывающие, вероятно, на локальные структурные изменения.

Рис. 4. показывает изменение скорости деформации мерзлой супеси со временем. На первой стадии скорость высока, но затем постепенно снижается, что соответствует затухающей фазе ползучести. В промежутке 1500–2000 дней скорость большинства образцов стабилизируется, что свидетельствует о завершении активных деформационных процессов. На некоторых участках (рис.4) наблюдаются колебания скорости деформации, связанные, возможно, с локальными изменениями структуры грунта.

Рассмотрим возможные причины колебания скорости деформации:

1. В некоторых опытах наблюдаются резкие скачки деформации (рис. 3). Вероятно, это объясняется неоднородным распределением порового льда и наличием микротрещин в структуре грунта. При воздействии нагрузки локальные разрушения вызывают резкие скачки деформации. Засоленность грунта может способствовать локальному перераспределению порового льда, что временно снижает прочность материала.

2. Возможна также перекристаллизация и режеляция льда (рис. 4) в поровом пространстве и миграция влаги под длительным воздействием нагрузки. Также возможны фазовые переходы (таяние и последующее замерзание) льда. Упрочнение структуры мерзлого грунта может происходить также за счет формирования ледяных шлиров, что может приводить к временной стабилизации деформаций.

3. Наблюдаются некоторые различия между образцами, что, вероятно, обусловлено структурной неоднородностью грунта, связанной с условиями подготовки образцов. Неравномерное распределение льда и соли внутри образцов могло привести к вариациям в деформационном поведении.

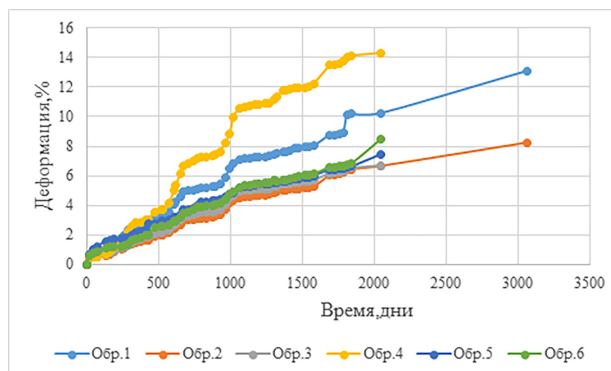


Рис.5. Кривые длительного деформирования мерзлого морского суглинка при засолённости 0,5%, плотности грунта 1,68 г/см³, плотности частиц 2,70 г/см³, влажность 0,46 и нагрузка 0,1 МПа. Температура -3°C, цифрами обозначены номера образцов

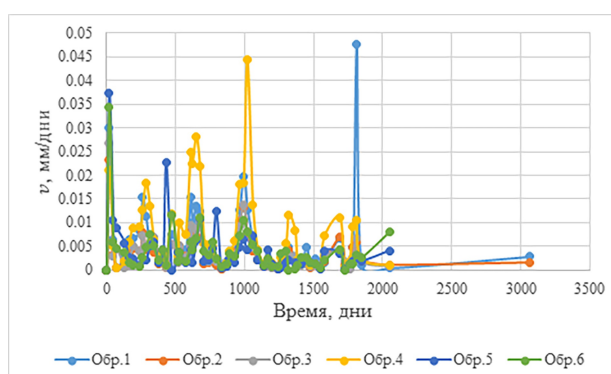


Рис.6. Кривые скорости деформации мерзлого суглинка. Температура -3°C, цифрами обозначены номера образцов

На Рис. 5 представлены графики деформации образцов мерзлого морского суглинка с засолённостью 0,5%, плотностью 1,68 г/см³ и влажностью 0,46 при нагрузке 0,1 МПа и температуре -3°C. Кривые демонстрируют в целом затухающую деформацию во времени, характерную для мерзлых грунтов. На начальном этапе наблюдается интенсивное увеличение деформации, за которым следует стабилизация на более поздних стадиях. Однако образцы №4 и №5 выделяются аномальным поведением: фиксируются скачки или локальные отклонения в процессе деформации.

Рис. 6 иллюстрирует изменение скорости деформации во времени для тех же образцов. Общая тенденция соответствует двум фазам ползучести: первичной (затухающей) и вторичной (стабильной). При этом скорости деформации изменяются неравномерно, что выражается в виде колебаний. Особое внимание привлекает образец №5, который демонстрирует значительно более высокую начальную скорость деформации, что может быть связано с ослаблением межчастичных связей из-за неоднородного распределения льда в структуре грунта, или повышением напряжений в грунтовой матрице.

Вероятно, внезапные изменения на кривых деформации могут быть обусловлены локальным разрушением ледяных связей или перераспределением напряжений внутри грунтовой структуры. Для глинистых грунтов с высокой пористостью и значительным содержанием воды такие процессы являются типичными (Рис. 6). Возможно, изменения скорости деформации во времени вызваны несколькими факторами: перераспределением льда в поровом пространстве, а также формированием и закрытием микротрещин под нагрузкой, что вызывает локальные изменения структуры и приводит к временному ускорению или затуханию деформаций. Засолённость грунта (0,5%), вероятно, также оказывает влияние на фазовые переходы воды и льда и их

перераспределение, что способствует изменению деформационных характеристик.

Модели длительной ползучести

К распространенным подходам относятся так называемые технические теории ползучести. Наиболее известными из них являются степенная и гиперболическая зависимости, основанные на положениях статистической механики (формула Эйринга), а также формула, описывающая теорию упрочнения. По другой теории (старения) устанавливается зависимость не между скоростью деформирования и напряжением, а между деформацией, напряжением и временем. Эта формула, известная как уравнение С.С. Вялова, получила широкое применение благодаря его исследованиям. Кроме того, существует ряд альтернативных подходов, используемых для описания ползучести мерзлых грунтов.

К полученным данным были применены три методики обработки, основанные на следующих формулах [12].

Во-первых, была использована формула так называемой технической теории старения:

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{\xi} t^a \right)^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

Где t – время; ε -деформация; σ -напряжение; ξ , a, m –параметры.

во-вторых, теории упрочнения:

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{a} \right)^{\frac{1}{m}} t^a \quad (2)$$

Где t – время; ε -деформация; σ -напряжение; a , m , a -параметры.

и, в-третьих, теории течения:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = b \sigma^n \quad (3)$$

Где t – время; ε -деформация; σ -напряжение; b , n -параметры.

Эксперименты, проведенные в течение 10 лет, позволили исследовать закономерности деформации грунта при длительном воздействии постоянного напряжения. Для каждого типа грунта было вычислено среднее значение деформации, которое использовалось для описания общей тенденции изменения деформации. На основе полученных данных выполнена аппроксимация, направленная на определение параметров используемых моделей. Итоговые результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение расчетных параметров деформации в кратковременных и длительных испытаниях для различных грунтов

Теория		Старения			Упрочнения			Течения	
Грунт	Дни	ξ	a	m	ξ	a	m	b	n
Песок	41	0.005	0.007	2.282	0.020	0.041	1.128	0.800	0.007

Песок	41	0,005	0,097	2,383	0,029	0,041	1,138	0,800	0,907
	2021	0,005	0,584	3,967	0,010	0,147	3,209	1,887	3,125
Супесь	32	0,865	0,145	1,593	0,865	0,090	1,593	0,469	2,576
	2063	4,835	0,502	0,758	8,667	0,662	0,919	0,967	5,167
Сугли- нок	49	8,730	0,882	3,186	1,297	0,277	1,826	0,999	1,779
	2049	4,168	0,770	1,096	7,428	0,703	1,266	1,480	2,589

У супесей и суглинков в трех моделях параметры (σ , m , b , n) значительно различаются между краткосрочным и долгосрочным периодами. У песков изменения параметров (\square , a) минимальны, поэтому краткосрочные модели с экстраполяцией трендов могут быть приемлемы для долгосрочного прогноза. Строительным конструкциям требуется определенный запас прочности, так как кратковременное испытания не позволяют надежно оценить деформации за десять лет.

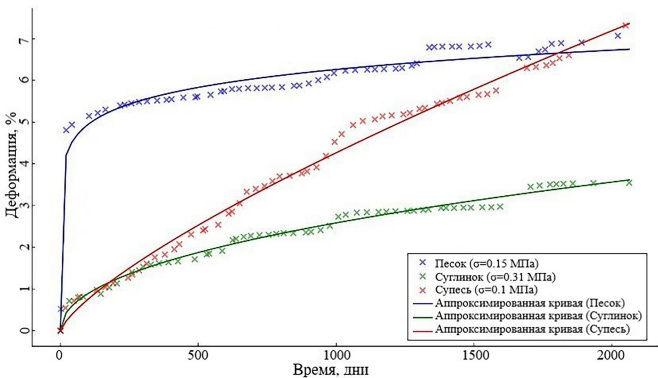


Рис. 7. Сравнение экспериментальных данных и расчетных кривых ползучести на основе теории старения для разных типов мерзлых грунтов

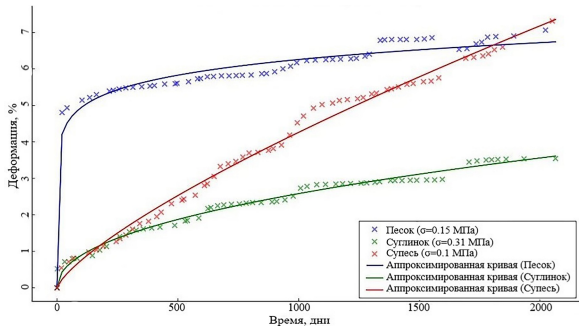


Рис. 8. Сравнение экспериментальных данных и расчетных кривых ползучести на основе теории упрочнения для разных типов мерзлых грунтов

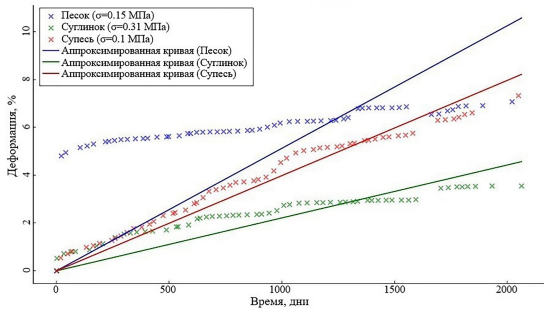


Рис. 9. Сравнение экспериментальных данных и расчетных кривых ползучести на основе теории течения для разных типов мерзлых грунтов

Для оценки точности предсказаний каждой теории было дополнительно выполнено

вычисление средней ошибки (MSE, %) для расхождения между экспериментальными данными и теоретическими значениями. Среднеквадратическая ошибка, как известно, это мера точности, позволяющая сравнивать ошибки прогнозирования различных моделей для определенного набора данных [18]. Среднеквадратичная ошибка (MSE, %) для теорий старения и упрочнения для песка составляет около 5%. Для теории течения MSE для песка значительно выше и достигает 37%. Для мерзлой морской супеси по теории старения и упрочнения MSE составляет около 14%, а по теории течения 28%. Для мерзлого морского суглинка по теории старения и упрочнения MSE составляет 8%, а по теории течения - 18%.

Обсуждение результатов

Настоящее исследование направлено на изучение длительной ползучести мерзлых грунтов (песка, супеси и суглинка) в условиях постоянных температур и нагрузок, с акцентом на изменение скорости деформаций во времени. Анализ экспериментальных данных проведен с использованием теорий старения, упрочнения и течения, что позволило не только подтвердить существующие теоретические положения, но и выявить новые закономерности, важные для инженерной практики.

Пески демонстрируют минимальную ползучесть, а супесь и суглинок, обладающие большей пористостью и содержанием льда, в большей степени подвержены деформациям. Подтверждена низкая скорость деформаций песков (на 20-30% меньше, чем у супеси и суглинков). В супеси наблюдались структурные аномалии, связанные с неоднородным распределением льда, что было описано ранее [19].

В ходе экспериментов на всех типах грунтов (песке, супеси и суглинке) зафиксировано, что при низких нагрузках наблюдается затухающая ползучесть, стабилизирующаяся в течение 10 лет наблюдений. Эти данные согласуются с результатами [10], которые также наблюдали стабилизацию скоростей при умеренных нагрузках.

Для супеси и суглинка наблюдалось образование ледяных шлиров в процессе эксперимента, стабилизирующих структуру грунта при низких температурах. Это уменьшало скорость деформации, особенно в начальный период. Эти наблюдения согласуются с выводами [4], но дополняют их, описывая долгосрочные эффекты стабилизации, которые не рассматривались в предыдущих исследованиях. В определенном диапазоне засоленности засоленные грунты, в отличие от незасоленных, продемонстрировали меньшую склонность к разрушению. Например, супесь с засолением 0,2% имела более низкую скорость деформации при одной и той же температуре (-3°C), чем песок с меньшим содержанием соли. Это подтверждает более ранние результаты о том, что засоленность укрепляет ледяные структуры в грунте и увеличивает их устойчивость [17].

Результаты проведенного исследования подтверждают эффективность применения теорий старения и упрочнения для описания ползучести мерзлых грунтов. Обе теории демонстрируют высокую точность на начальных и промежуточных стадиях деформации для различных типов грунтов, таких как песок, супесь и суглинок. Это согласуется с выводами, представленными в работе Вялова С.С., где подчеркивается значимость учета временных факторов при моделировании деформационных процессов в мерзлых грунтах [12]. Однако на поздних стадиях деформации наблюдается снижение точности моделей старения и упрочнения. Это может быть связано с усложнением реологических процессов, что подтверждает мнение Н.А. Цытовича,, отмечавшего необходимость учета

сложных нелинейных свойств мерзлых грунтов [11].

Теория течения показала значительно меньшую точность, особенно на поздних этапах деформации. Ограничения теории течения обсуждаются в работе Роман Л.Т., где подчеркивается необходимость введения нелинейных поправок для повышения точности моделей [20]. Применимость каждой из моделей в инженерной практике зависит от требуемой точности и сложности расчетов. Введение нелинейных поправок или использование более сложных математических моделей может повысить точность теории течения, особенно на поздних стадиях деформации.

Настоящее исследование проводилось на протяжении 10 лет, что позволило наблюдать долгосрочные изменения, включая стабилизацию скоростей деформации. Большинство других исследований ограничивалось краткосрочными наблюдениями, что не позволяло фиксировать подобные эффекты [21].

Выводы

1. Многолетние экспериментальные исследования показали, что длительная ползучесть мерзлых грунтов (песка, супеси и суглинка) имеет выраженные стадии деформации: начальную затухающую, стабилизирующуюся и (в отдельных случаях) ускоряющуюся. Для песков и супесей характерна стабилизация скорости деформации, в то время как суглинки демонстрируют сложное нелинейное поведение, связанное, возможно, с трещинообразованием и локальными процессами восстановления структуры.

2. Для супесей и суглинков характерны сложные деформационные зависимости, обусловленные, вероятно, неоднородным распределением льда и особенностями пористой структуры. Засоленные грунты демонстрируют меньшую деформируемость по сравнению с незасоленными образцами в определенном диапазоне концентрации засоленности.

3. Теории старения и упрочнения удовлетворительно описывают процессы ползучести мерзлых грунтов на начальных и промежуточных стадиях деформации, что подтверждается низкими значениями MSE. Теория течения имеет ограниченную применимость. Для повышения точности моделей рекомендуется введение нелинейных поправок или использование более сложных математических описаний, учитывающих реологические свойства мерзлых грунтов.

4. Полученные данные имеют ключевое значение для проектирования и эксплуатации инженерных сооружений в условиях вечной мерзлоты. Результаты позволяют прогнозировать долгосрочные деформационные процессы и повысить надежность оснований зданий и инженерных сооружений.

Библиография

1. Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В. и др. Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 742-756.
2. Li, X., Cheng, G.D. A GIS-aided response model of high altitude permafrost to global change // Science in China (Series D). 1999. № 42(1). С. 72-79.
3. Yu, F., Qi, J.L., Yao, X.L., Liu, Y.Z. In-situ monitoring of settlement at different layers under embankments in permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau // Engineering Geology. 2013. № 160. С. 44-53.
4. Qi, J., Wen, Z., Zhang, J. Settlement of embankments in permafrost regions in the

- Qinghai-Tibetan plateau // Norwegian Journal of Geography. 2007. № 61(2). С. 49-55.
5. Ma, W., Qi, J.L., Wu, Q.B. Analysis of the deformation of embankments on the Qinghai-Tibet railway // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2008. № 134(11). С. 1645-1654.
6. Bronfenbrener, L., Bronfenbrener, R. Creep characteristics of frozen soils under conditions of small strains // Cold Regions Science and Technology. 2012. № 79. С. 84-91.
7. Bray, M.T. The influence of cryostructure on the creep behavior of ice-rich permafrost // Cold Regions Science and Technology. 2012. № 79-80. С. 43-52.
8. Брушков А.В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. М.: Изд-во МГУ, 1998. 330 с.
9. Zhou, X., Guo, L., Li, Z. Multiaxial creep of frozen loess // Mechanics of Materials. 2016. № 95. С. 172-191.
10. Song, Y., Zhang, Y., Li, C. Creep characteristics and constitutive model for frozen mixed soils // Journal of Mountain Science. 2021. № 18(7). С. 1966-1976.
11. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. Москва: Изд-во МГУ, 1973.
12. Вялов С.С. Реология мерзлых грунтов // Под редакцией В.Н. Разбегина. Москва: Стройиздат, 2000.
13. Роман Л.Т., Брушков А.В., Магомедгаджиева А.М. Оценка достоверности определения длительной деформации мерзлых засоленных грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1996. № 2. С. 20-24.
14. Брушков А.В., Аксёнов В.И. Определение характеристик ползучести засоленных мерзлых грунтов из опытов на одноосное сжатие // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений: Сб. нач. тр. М.: "Наука", 1999. С. 83-90.
15. Zhang, H., Zhang, J., Zhang, Z., Chen, J., and You, Y. A consolidation model for estimating the settlement of warm permafrost // Computers and Geotechnics. 2016. № 76. С. 43-50.
16. Liingaard, M., Augustesen, A.H., Lade, P.V. Characterization of models for time-dependent behavior of soils // International Journal of Geomechanics. 2004. № 4(3). С. 157-177.
17. Chen, J., Yang, X., Li, D. A long-term strength criterion for frozen clay under complex stress states // Cold Regions Science and Technology. 2020. № 176. С. 103089.
18. Hyndman, R.J., Koehler, A.B. Another look at measures of forecast accuracy // International Journal of Forecasting. 2006. № 22(4). С. 679-688.
19. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. М.: МАЙК "Наука"/Интерпериодика, 2002. 426 с.
20. Роман Л.Т., Котов П.И. Определение вязкости мерзлых грунтов шариковым штампом // Криосфера Земли. 2013. Т. 17, № 4. С. 30-35.
21. Benedict, J.B. Frost creep and gelifluction features: A review // Quaternary Research. 1976. № 6. С. 55-76.

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Предметом исследования является изучение процесса длительной ползучести мерзлых грунтов в многолетних испытаниях.

Научные исследования в данном направлении достаточно актуальны, поскольку климатические изменения на планете и повышение среднегодовых температур в холодных регионах мира привели к значительным изменениям в строении и свойствах

вечной мерзлоты, сопровождающихся деградацией мерзлых грунтов. Это ставит под угрозу устойчивость инженерных сооружений расположенных в районах вечной мерзлоты. Ползучесть мерзлых грунтов – это процесс длительных деформаций при постоянной нагрузке, который влияет на устойчивость оснований зданий и сооружений. Она обусловлена рядом факторов (типом грунта, содержанием льда, влажностью, температурой и величиной нагрузки). Наличие микротрещин и ледяных шлиров в структуре мерзлых грунтов, а также зависимость ползучести от температуры делают эти материалы сложным объектом для прогнозирования. В связи с этим исследования, выполненные автором, вносят большой научный вклад в изучение вопроса длительной ползучести мерзлых грунтов.

Методология исследования. В настоящем исследовании проведен анализ многолетних деформаций мерзлых грунтов (песка, супеси и суглинка) методом одноосного сжатия в экспериментах, проведенных в Амдерминской подземной лаборатории. В экспериментах использовались засоленные мерзлые образцы нарушенного сложения. Образцы мерзлых грунтов отбирались из современных морских и аллювиальных четвертичных отложений в природных условиях на полуострове Ямал в соответствии с требованиями ГОСТ 12071-2014. Для получения образцов нарушенного сложения сухой грунт измельчался, смешивался с раствором морской соли заданной концентрации, чтобы достичь заданных значений засоленности и влажности. Промораживание грунтов до -20°C осуществлялось в теплоизолированных контейнерах с односторонним охлаждением в течение 3–7 суток. После завершения процесса подготовки торцы образцов зачищались, фиксировались их размеры, масса, определялась льдистость. Для одноосного сжатия использовались цилиндрические образцы диаметром 45–50 мм и высотой 100 мм. Для испытаний использовались 18 образцов грунтов (песок, супесь и суглинок). Образцы закрепляли в приборе для одноосного сжатия. Применялись постоянные нагрузки для изучения длительных деформаций грунтов. Длительность экспериментов составляла до 10 лет. Испытания проводились в подземной лаборатории Амдерминской мерзлотной станции на глубине 14 м

Научная новизна заключается в том, что выполнены многолетние исследования мерзлых грунтов, распространенных на Арктическом побережье. Изучение длительных деформационных процессов в мерзлых грунтах представляет собой одну из ключевых задач современной инженерной геокриологии.

Цель работы заключалась в изучении динамики изменения скорости деформации во времени, оценке стабильности деформаций грунтов и уточнении параметров используемых моделей ползучести, что имеет важное значение для проектирования и эксплуатации сооружений в условиях вечной мерзлоты.

Стиль статьи – научный. Статья очень информативная, снабжена табличным и иллюстративным материалом, что придает ей значимое преимущество. Эксперименты, проведенные в течение 10 лет, позволили исследовать закономерности деформации грунта при длительном воздействии постоянного напряжения. Для каждого типа грунта было вычислено среднее значение деформации, которое использовалось для описания общей тенденции изменения деформации. На основе полученных данных выполнена аппроксимация, направленная на определение параметров используемых моделей. По своему объёму статья соответствует требованиям журнала.

Библиография статьи включает в себя 21 литературный источник, 13 из которых – на иностранном языке. Однако, следует отметить, что практически все литературные источники (за исключением 3-х), используемые в статье, довольно старые (более, чем 15-летней давности). Желательно, чтобы в статьях журналов списка ВАК большая половина источников была не старше 7-10 лет.

Выводы в статье лаконичны и передают основную мысль автора по проведенным

результатам исследований. Автор приходит к выводу, что длительная ползучесть мерзлых грунтов (песка, супеси и суглинка) имеет выраженные стадии деформации: начальную затухающую, стабилизирующуюся и (в отдельных случаях) ускоряющуюся. Для песков и супесей характерна стабилизация скорости деформации, в то время как суглинки демонстрируют сложное нелинейное поведение, связанное, возможно, с трещинообразованием и локальными процессами восстановления структуры. Засоленные грунты демонстрируют меньшую деформируемость по сравнению с незасоленными образцами в определенном диапазоне концентрации засоленности.

Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на использованные литературные источники и выражении авторского мнения по изучаемой проблеме.

Рецензируемая статья несомненно будет интересна, полезна ученым и практикам грунтоведам и мерзлотоведам, поскольку полученные данные имеют ключевое значение для проектирования и эксплуатации инженерных сооружений в условиях вечной мерзлоты. Результаты позволяют прогнозировать долгосрочные деформационные процессы и повысить надежность оснований зданий и инженерных сооружений.

Данная статья рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика».

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Качор О.Л., Паршин А.В., Трусова В.В., Курина А.В., Икрамов З.Л. Оценка качества атмосферного воздуха в районе будущего экотехнопарка "Восток" (г. Усолье-Сибирское, Иркутская область) по данным снегогеохимической съемки // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.73789 EDN: QTTSML URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=73789

Оценка качества атмосферного воздуха в районе будущего экотехнопарка "Восток" (г. Усолье-Сибирское, Иркутская область) по данным снегогеохимической съемки

Качор Ольга Леонидовна

доктор технических наук

доцент; Сибирская школа геонаук; Иркутский национальный исследовательский технический университет
руководитель департамента геоэкологии; Сибирская школа геонаук; Иркутский национальный исследовательский технический университет

664074, Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3

✉ olgakachor@geo.istu.edu



Паршин Александр Вадимович

ORCID: 0000-0003-3733-2140

кандидат геолого-минералогических наук

директор; Сибирская школа геонаук; Иркутский национальный исследовательский технический университет
старший научный сотрудник; Институт геохимии СО РАН

664074, Россия, Иркутская обл., г. Иркутск, Свердловский р-н, ул. Академика Курчатова, д. 3

✉ sarhin@geo.istu.edu



Трусова Валентина Валерьевна

кандидат технических наук

старший научный сотрудник; Сибирская школа геонаук; Иркутский национальный исследовательский технический университет

664074, Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3

✉ wtrusova@geo.istu.edu



Курина Анастасия Владимировна

инженер-исследователь; Сибирская школа геонаук; Иркутский национальный исследовательский технический университет

664074, Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3

✉ kurinanaya@geo.istu.edu



Икрамов Зиевиддин Лутфиддин угли

аспирант; Сибирская школа геонаук; Иркутский национальный исследовательский технический университет

664074, Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3

✉ ziyoviddin.ikramov1992@gmail.com

[Статья из рубрики "Инженерная геология холодных равнинных и горных регионов"](#)**DOI:**

10.7256/2453-8922.2025.2.73789

EDN:

QTTSLM

Дата направления статьи в редакцию:

22-03-2025

Дата публикации:

16-04-2025

Аннотация: Предметом работы является развитие методики снегогеохимических исследований для эффективной экспрессной оценки качества атмосферного воздуха в условиях техногенного воздействия от различных промышленных источников, формирующих комплексное загрязнение окружающей среды, а также создание информационно-картографической основы для дальнейшего экологического мониторинга значимого района Байкальского региона. На примере детальной оценки загрязнения атмосферы в районе строительства экотехнопарка "Восточный" производится сопоставительный анализ информативности картограмм распределения загрязняющих веществ в снеговой воде и в твердом остатке. На рассматриваемой территории находятся различные источники техногенных воздействий – от металлургического предприятия до объектов теплоэнергогенерации, в связи с этим данный кейс отлично характеризует преимущества метода снегогеохимической съемки как наиболее представительного способа оценки загрязнения атмосферы в задачах экологического мониторинга "зимних" регионов, снятия экологических рисков с новых горных проектов в северной части Евразии, контроля производственной деятельности в городах с устойчивым снежным покровом. Оптимизация данного вида геоэкологических исследований является весьма актуальной задачей. Произведен отбор проб сезонного снега, таяние и фильтрация снеговой воды с целью разделения растворимых и нерастворимых форм поллютантов. Выполнен химический анализ снеговой воды и твердого остатка. Определены ассоциации элементов, отвечающие различным источникам воздействий. Представлены картографические материалы, характеризующие распределение поллютантов на площади. Исследование позволяет наглядно сравнить результаты, получаемые по традиционной, но затратной методике анализа снеговой

воды с помощью прецизионных химико-аналитических методов ICP-AES/MS, и по экспрессной и дешевой методике анализа твердого остатка с помощью неразрушающего анализа XRF. Показано, что второй способ также является весьма информативным, он позволяет с минимальными затратами детально охарактеризовать геоэкологическую обстановку на значительной площади, выявить и закартировать зоны с аномальными по техногенным причинам состоянием атмосферы. В результате дана наиболее детальная в пространственном отношении характеристика загрязнения воздуха в районе г. Усолье-Сибирское, который является постоянным объектом внимания со стороны государственных органов экологического контроля как рекультивируемый объект накопленного вреда окружающей среде и одновременно перспективная производственная площадка. Описанные методические подходы применимы для широкого перечня геоэкологических ситуаций в регионах с длительной зимой.

Ключевые слова:

загрязнение атмосферы, снегогеохимическая съемка, экологический мониторинг, тяжелые металлы, снеговой покров, оценка фонового состояния, ртуть, Усолье-Сибирское, качество воздуха, объекты накопленного вреда

Введение

Байкальская природная территория относится к уникальным геосистемам мира и в то же время испытывает существенное антропогенное воздействие – как вследствие ведущейся в настоящее время хозяйственной деятельности, так и вследствие негативного влияния заброшенных промышленных объектов прошлого. Эффективные программы экологического мониторинга и достоверные данные, на основе которых можно принимать объективные управленческие решения, критически важны для сохранения этой уникальной экосистемы и обеспечения высокого качества жизни людей. Особое значение для устойчивого развития Прибайкалья имеет решение проблемы объектов накопленного вреда окружающей среде, которая включает рекультивацию уже известных объектов, выявление новых объектов, оценку и мониторинг их влияния на окружающую среду с учетом региональных и локальных эколого-геохимических особенностей природной среды региона.

Одним из наиболее известных объектов накопленного вреда окружающей среде в Прибайкалье, находящимся под пристальным вниманием органов власти и журналистов, является город Усолье-Сибирское – один из старейших городов Сибири, расположенный в 70 км к северо-западу от областного центра – города Иркутск на левом берегу реки Ангары, с населением 75 тыс. человек, являющийся крупным промышленным центром Восточной Сибири. На территории Усо́лья-Сибирского действуют предприятия различных индустрий - ООО «Усо́льмаш» (предприятие по производству горно-шахтного, обогащительного и металлургического оборудования), СХПК «Усо́льский свинокомплекс» (мясоперерабатывающий комбинат), предприятия по производству строительных материалов, предприятия лесопереработки, теплоэнергетики и др.

Также на территории города находится промплощадка завода «Усо́льехимпром» по производству хлора и каустика ртутным методом, проработавшего с 1936 по 2017 годы. Промплощадка завода расположена в северной и северо-восточной части города и занимает 610 гектаров. За время работы цеха ртутного электролиза общее поступление ртути в окружающую среду составило по разным оценкам от 1354 до 1396 тонн, при этом

в воздушный бассейн поступило 62–78 тонн, в Братское водохранилище – 50–76 тонн [1]. После прекращения эксплуатации цеха ртутного электролиза в 1998 году суммарный объем ртути поступающей в водохранилище снизился [2], но промплощадка продолжала наносить негативное воздействие на окружающую среду из-за аварийных корпусов завода, шламонакопителя [3] и большого количества отходов, оставшихся на территории предприятия [4], также источниками поступления загрязняющих веществ в Братское водохранилище стали донные отложения, поверхностный сток и сточные воды с Усольской промышленной зоны [5].

О негативном влиянии бывшей промплощадки на различные объекты окружающей среды свидетельствуют многочисленные работы, посвященные изучению микро- и макроэлементного состава воды, донных отложений, фитопланктона, зоопланктона, рыбе Братского водохранилища, почвы, снегового покрова, сточных и талых вод с промплощадки, накоплению ртути высшими растениями, грибами, водными растениями [6-21].

Завод практически прекратил свою деятельность в 2014 году, в 2017 году был признан банкротом, при этом на территории осталось примерно 1,7 млн тонн химических отходов, включая ртуть, хлорорганические соединения и токсичные вещества, которые хранились без надлежащего контроля [22]. После полного прекращения работы предприятия в 2017 году площадь территории загрязнения составила 1608 га, объём накопленных отходов – 4,3 млн м³ [23]. При отсутствии должных мероприятий по демеркуризации отходов в городе сложилась катастрофическая экологическая обстановка, которая потребовала введения режима ЧС регионального уровня с октября 2018 года из-за опасности утечек ядовитых веществ с предприятия. Приказом Минприроды России от 29.07.2020 № 507 «Территория, на которой в прошлом осуществлялась экономическая деятельность, связанная с производством химических веществ и химических продуктов на территории городского округа г. Усолье-Сибирское» включена в государственный реестр объектов накопленного вреда окружающей среде (НВОС). Работы по ликвидации накопленного вреда окружающей среде – бывшее предприятие ООО «Усольехимпром» и загрязнённая территория г. о. Усолье-Сибирское – проводит Федеральный экологический оператор (предприятие госкорпорации «Росатом»). В 2020-2021 годах произведена ликвидация наиболее сложных объектов на промышленной площадке: переведены в безопасное состояние и перезатарены 17 аварийных цистерн, ликвидированы 12 скважин рассолопромысла и цех ртутного электролиза. В настоящее время демонтировано более 90 % общего объема надземных и подземных частей зданий и сооружений [24].

Несмотря на проводимые работы и снижение количества загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду с промплощадки, территория завода продолжает оказывать негативное влияние на окружающую среду, в том числе, за счет веществ, накопленных в объектах окружающей среды за годы функционирования предприятия [25-33]. В 2023 году по данным мониторинга реки Ангара на участке гг. Усолье-Сибирское — Свирск в створах наблюдений, расположенных в черте и ниже города, отмечаются среднегодовые концентрации ртути, превышали ПДК. В воде водохранилища Братского (р. Ангара) в районе г. Усолье-Сибирское в створах наблюдений, расположенных в черте и ниже города зарегистрировано 5 случаев экстремально высокого загрязнения ртутью [34]. Среди поллютантов, помимо ртути, также встречаются в значительной концентрации мышьяк, свинец, цинк, медь и никель, которые переносятся с осадками и другими природными процессами по окружающей территории, включая жилые зоны.

Таким образом уровень загрязнения окружающей среды остаётся высоким [25-33].

Особое значение на современном этапе развития систем экологического мониторинга и контроля имеет качество атмосферного воздуха, решение проблем загрязнения которого является одним из приоритетных направлений в соответствии с национальным проектом «Экологическое благополучие», включающим федеральный проект «Чистый воздух». Воздух как объект окружающей среды оказывает наибольшее влияние на здоровье населения, т.к. контакт с ним непрерывен, и в случае загрязнения атмосферы поллютанты могут переноситься на значительные расстояния от источника воздействий.

В г. Усолье-Сибирское на состояние атмосферного воздуха оказывают влияние как объект накопленного вреда окружающей среде, так и действующие в городе 34 предприятия и объекты ТЭК [35]. Так, по данным [36] город входил в список 33 населенных пунктов с оценкой степени загрязнения атмосферного воздуха, соответствующей значению $ИЗА \geq 14$ (очень высокий). К основным примесям, вносящим наибольший вклад в загрязнение атмосферы города, относятся бенз(а)пирен, формальдегид, взвешенные вещества [34]. Наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха вносят предприятия теплоэнергетики [34], сельского хозяйства, машиностроения, площадки для хранения отходов производства и потребления IV-V классов опасности [35], автотранспорт.

В то же время город Усолье-Сибирское рассматривается как перспективный научно-производственный центр, в его пределах в настоящее время ведутся работы по созданию Федерального центра химии [37, 38]. В рамках национального проекта «Экология» и федерального проекта «Инфраструктура для обращения с отходами I-II классов» на территории промплощадки планируется строительство экотехнопарка «Восток», который будет перерабатывать отходы и возвращать полезные компоненты в хозяйственный оборот. Считается, что это позволит минимизировать вредное воздействие на окружающую среду и создать не менее 6000 рабочих мест для жителей города (Вести-Иркутск https://vk.com/video-35929536_456264362). Безусловно, новые производства станут объектом экологического мониторинга, для обеспечения которого весьма желательно изучить фоновое состояние атмосферного воздуха, которое, как было отмечено выше, уже характеризуется высоким уровнем загрязнения.

Поскольку Усолье-Сибирское расположено в северном регионе, с продолжительной зимой и устойчивым сезонным снежным покровом, то наиболее эффективным способом комплексной и детальной в геопространственном отношении оценки загрязнения воздуха является изучение распределения поллютантов в жидкой и твердой фазе сезонных проб снега. Данная работа посвящена изучению текущего состояния атмосферного воздуха в г. Усолье-Сибирское в преддверии значительных изменений в хозяйственной деятельности муниципального образования для создания базовой информационно-картографической основы для обеспечения дальнейших режимных наблюдений.

Методы исследования

Исследования снегового покрова являются одним из универсальных способов контроля за состоянием приземной атмосферы, позволяющим дать комплексную характеристику состояния атмосферного воздуха и антропогенного загрязнения окружающей среды, в связи с чем такой подход широко используется во многих «зимних» городах и районах [39-49]. Снег адсорбирует из воздуха значительную часть загрязняющих веществ: аэрозоли (в т. ч. пыль), газы, тяжелые металлы, как во время снегопада, так и в

периоды залегания, в результате чего минеральные и органические вещества накапливаются в однородном естественном субстрате, сохраняясь до периода таяния в неизменном виде. По составу снежного покрова возможно надежно установить устойчивую структуру атмосферных выпадений, учитывая ландшафтно-климатические условия, и идентифицировать антропогенные источники воздействия. Необходимо отметить, что ряд исследователей уже применяли для изучения качества воздуха в городе Усолье-Сибирское методы снегогеохимических исследований, однако проводимое исследование является существенно более детальным,

В 2023-2024 года в период максимального накопления влагозапаса в снежном покрове был проведен отбор проб снега с целью выявления загрязнения атмосферного воздуха в г. Усолье-Сибирское. В 2023 г. 25 февраля было отобрано 52 пробы по пяти маршрутам (рис. 1), в 2024 г. 9 марта отобрано 70 проб снега (рис. 2). Также на значительном удалении от жилых домов и дорог в лесной зоне была отобрана фоновая проба (рис. 1, 2).

Пробоотбор снега произведён с учётом требований ГОСТ Р 70282-2022 «Охрана окружающей среды. Поверхностные и подземные воды. Общие требования к отбору проб льда и атмосферных осадков». Отбор проб производился на участках размером от 5х5 м до 10х10 м методом «конверта». Пробы отбирались на всю мощность из шурфов лопатами из химически стойкого полимерного материала, при этом с поверхности удалялся мусор (листья, ветки и др.), исключалось попадание в образец частиц почвы. Из отобранных проб с одного участка составлялась объединенная проба, весом не менее 10 кг, которая помещалась в емкость из химически стойкого полимерного материала (полиэтиленовый пакет) и маркировалась.

Пробы снега доставлялись в лабораторию, где производили растапливание проб при комнатной температуре, отфильтровывали через фильтр «синяя лента», измеряли объем каждой пробы и отфильтровывали через фильтр «белая лента». Анализировался твердый остаток, оставшийся на фильтрах после фильтрования. Анализ твердого остатка после таяния снеговой воды проводился с использованием портативного рентгенофлуоресцентного анализатора SciAps серии X200 на 20 элементов [\[50\]](#). Химический анализ проб на содержание различных элементов в талой снеговой воде проводился на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) Thermo Scientific iCAP 6300DUO, таким образом были определены концентрации K, Ca, Si, Mg, Cu, As, Na, Pb, Zn. Ртуть определялась методом атомной абсорбции на спектрометре «РА-915+» с приставкой «РП-91С».

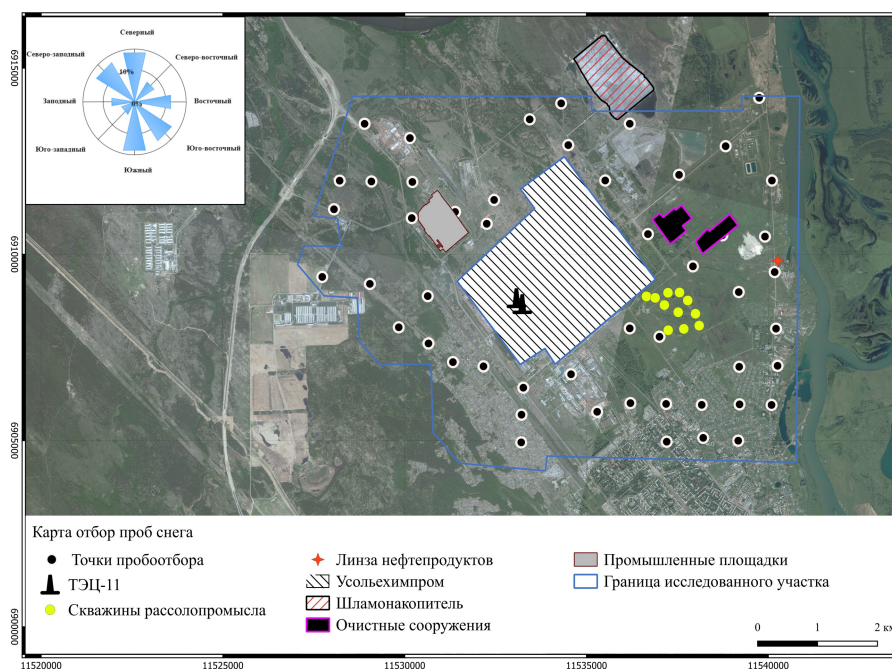


Рис. 1. Схема отбора проб снега в 2023 г.

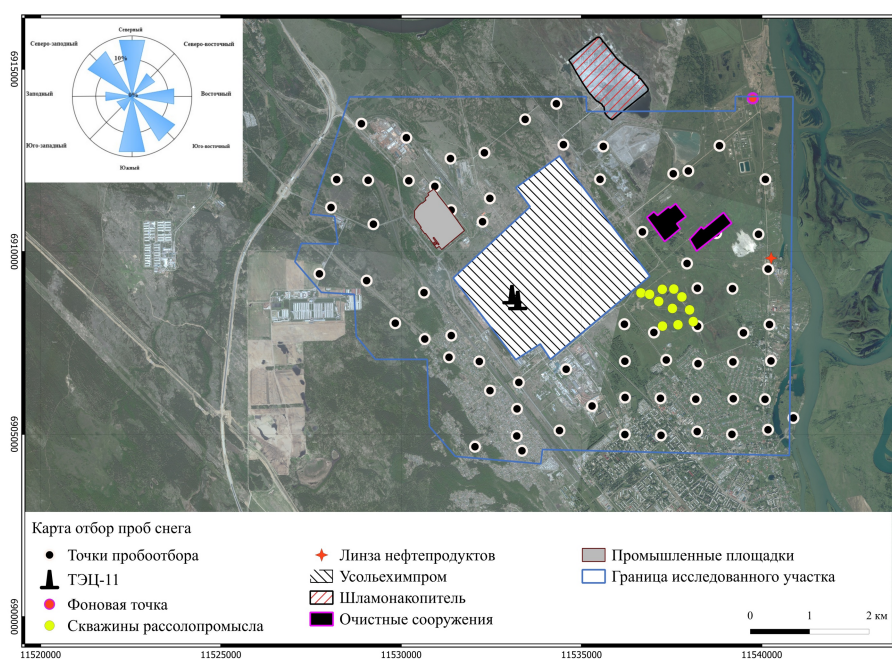


Рис. 2. Схема отбора проб снега в 2024 г.

Кроме точек пробоотбора, на рисунках 1 и 2 отмечены некоторые известные объекты, являющиеся или являвшиеся источником загрязнения окружающей среды, в частности: сама территории бывшей промлощадки «Усольехимпрома», 12-ть ликвидированных скважин рассолопромысла, очистные сооружения, шламонакопитель, ТЭЦ-11, промышленные площадки других производственных объектов.

Отдельно следует дать комментарий о выборе «фоновых» точек. В данной работе анализируется как снеговая вода, что наиболее типично для эколого-геохимических исследований снегового покрова [10, 11, 49], так и твердый осадок, такой подход пока применяется существенно реже [13, 51]. В первом случае мы получаем информацию о водорастворимых формах загрязнителей, которые затем после таяния снега перейдут в

почву и далее по трофической цепи, во втором случае – о нерастворимых формах, которые, тем не менее, будут поступать в легкие человека в виде пыли. При этом пылевые частицы переносятся на меньшие расстояния, оседая ближе к источнику образования. За фоновые химические параметры в снеговой воде принимаются концентрации поллютантов в пробах с северных территорий, не подверженных техногенному воздействию [\[13, 51\]](#), зачастую они могут лежать ниже предела обнаружения даже современных высокочувствительных методик типа ICP-AES [\[50\]](#). Однако на таких фоновых участках, ввиду отсутствия техногенного влияния, формирующего пылевую нагрузку, твердый осадок на фильтрах, который можно было бы подвергнуть химическому анализу и определить фоновые содержания, практически отсутствует. Поэтому фоновые пробы для получения некоторых опорных значений концентрации загрязняющих веществ в твердом остатке на фильтрах в данном исследовании выбирались исходя из двух принципов – во-первых, на изучаемых территориях с техногенным влиянием (чтобы этот остаток имел место быть), а во-вторых, с площади с наименьшим уровнем этого техногенного влияния – в направлении наименьшей повторяемости ветров, вдали (несколько км) от источников воздействия. Для наших исследований такая проба была выбрана в северо-восточном направлении от основной территории исследования. Таким образом для снеговой воды далее мы будем говорить о сравнении с региональным фоном, а для твердого осадка – о сравнении с локальным фоном района города Усолье-Сибирское.

Результаты исследования и их обсуждение

В первую очередь результаты химико-аналитических исследований проб твердого остатка на фильтрах были подвергнуты математическому анализу для оценки качества получаемого химико-аналитического результата. Это связано с необходимостью обоснования достаточной чувствительности рентгенофлуоресцентного анализа для корректного описания наблюдаемой вариабельности химических параметров, особенно в случае применения мобильной аппаратуры. Метод ICP-AES является стандартно применяемым в подобных задачах вследствие чего дополнительного обоснования допустимости его применения не приводится. На рисунке 3 представлены диаграммы размаха для ряда элементов, полученных в результате РФА-анализа.

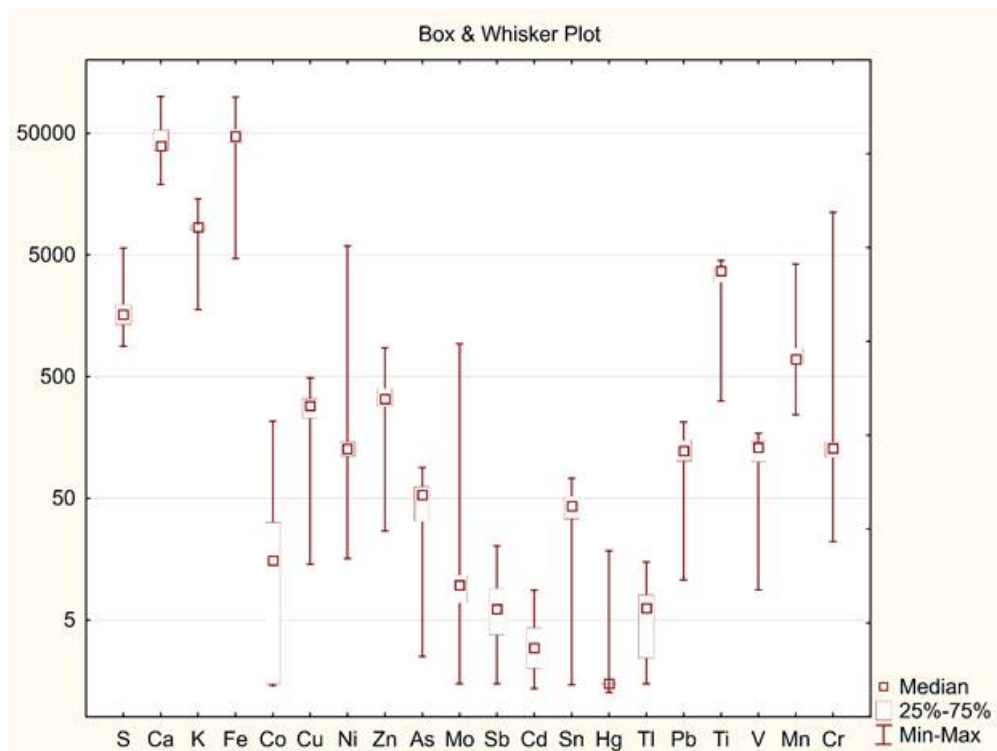


Рис. 3. Диаграммы размаха по результатам РФА-анализа твердого осадка в снеговом покрове

Из рисунка 3 видно, что все элементы имеют значимую изменчивость, лежащую в пределах чувствительности используемой аппаратуры [50]. Некоторым исключением является ртуть, медианное значение лежит ниже предела обнаружения, однако повышенные значения фиксируются корректно. Вследствие этого полученные данные могут быть использованы для дальнейшей математической и геостатистической обработки.

По результатам факторного анализа методом главных компонент, основной вклад в общую дисперсию (15-28%) вносят три первых фактора, а ртуть самостоятельно выделяется в четвертый (таблица 1).

Таблица 1. Результаты факторного анализа химических параметров твердого осадка

Номер ГК	Ассоциация элементов	Вклад в дисперсию, %
1	Cu+As+Se+Ti+V + Fe+Zn+Sn+Pb	28
2	Cr+Co+Ni+Mo	23
3	невыраженная	15
4	Hg	7.5

Исходя из этого следует, что ртуть по всей видимости имеет отдельный источник, а интерпретация для ключевых элементов выявленных ассоциаций приведена далее (рисунки 4 и последующие). Наряду с картами распределения химических параметров в твердом осадке также представлены для анализа результаты исследований воды, которые в связи с небольшим количеством определённых элементов дополнительному математическому анализу не подвергались.

Все представленные картографические материалы подготовлены в системе координат

EPSG 3395 (Эллипсоид WGS 84 / Проекция World Mercator).

Поскольку нормативов содержания загрязняющих веществ в снежном покрове не существует, то опорными значениями могут служить фоновые концентрации в пробах, отобранных в техногенно незагрязненных районах. Ввиду значительного переноса воздушных масс на большие расстояния для установления фона необходимо выбирать территории на значительном удалении (несколько десятков км) от любых источников негативного влияния. В ходе наших предыдущих исследований нами были получены данные о составе снежного покрова в Арктических районах Сибири и Дальнего Востока [51]. Пробы снега с этих территорий были подвергнуты такого же рода исследованиям на ICP-AES и были получены следующие усредненные результаты в мг/дм³ в отфильтрованной талой снеговой воде: К <1; Са 0,3; Si <0,05; Mg - 0,06; Cu 0,004; As <0,005; Na <1; Pb <0,001; Zn <0,006, Hg <0,05 (мкг/дм³) [51].

На рис. 4 приведены карты распределения ртути в снеговой воде и твердом остатке на фильтрах.

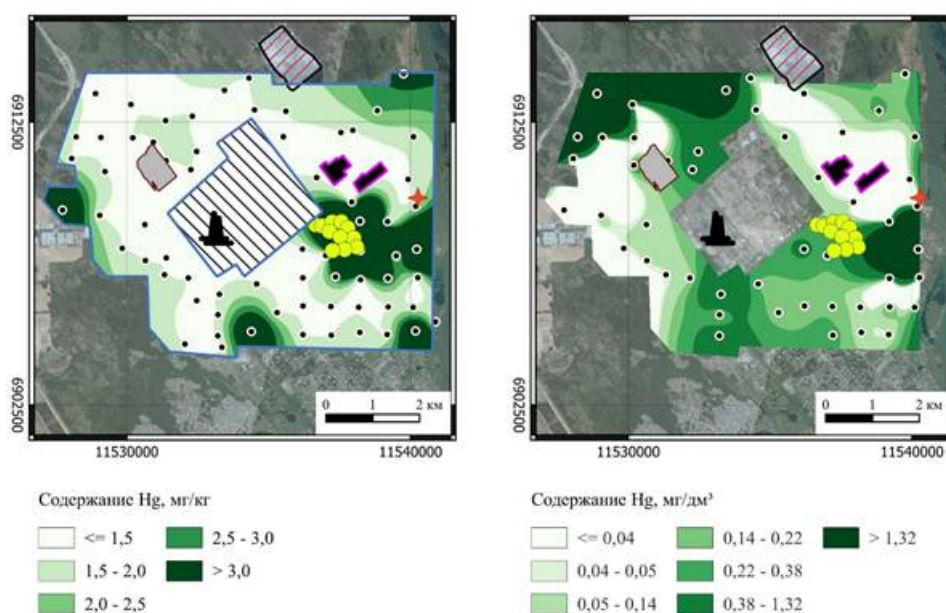


Рис. 4. Карта распределения нерастворимых (слева) и растворимых (справа) соединений ртути

Как видно из рис. 4, единственная значимая аномалия по ртути (затрагивающая сразу несколько смежных пробных площадок, а не единичные пробы) расположена к востоку от бывшей промлощадки «Усольехимпрома», включая область 12-ти ликвидированных скважин рассолопромысла. Основные зоны загрязнения снеговой воды ртутью расположены в 2-3 км на северо-запад и юго-восток от территории бывшей промлощадки «Усольехимпрома» с превышением фона от 26 раз. Самые чистые зоны в районе Усольского свиного комплекса и железнодорожной станции «Мальтинка», а также в районе очистных сооружений к северо-западу от промлощадки «Усольехимпрома».

На рис. 5 представлены карты распределения мышьяка в талой воде и твердом остатке на фильтрах.

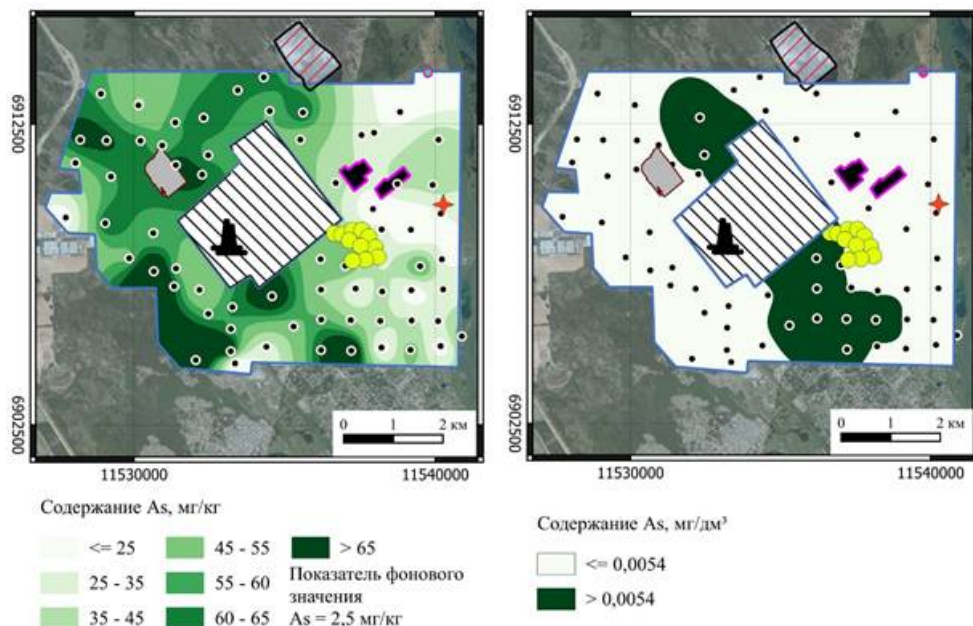


Рис. 5. Карты распределения нерастворимых (слева) и растворимых (справа) соединений мышьяка

Как видно из рис. 5. по карте распределения мышьяка в твердом остатке можно судить о практически повсеместном его присутствии на изучаемой территории, однако самая крупная аномалия выделяется в юго-западной части района, относящейся к территории садоводств и простирающейся вдоль автодороги «Байкал» и железнодорожных путей. Фон по мышьяку в этом районе превышен более, чем в 26 раз.

По анализу содержания мышьяка в талой воде можно выделить лишь зоны с незначительным максимальным превышением в 1,8 раз. Зоны с повышенным содержанием мышьяка в твердом остатке и жидкой фазе заметно отличаются, хотя несколько смещенная аномалия северо-западного простираения, проходящая через бывшую промплощадку, присутствует на обеих картах.

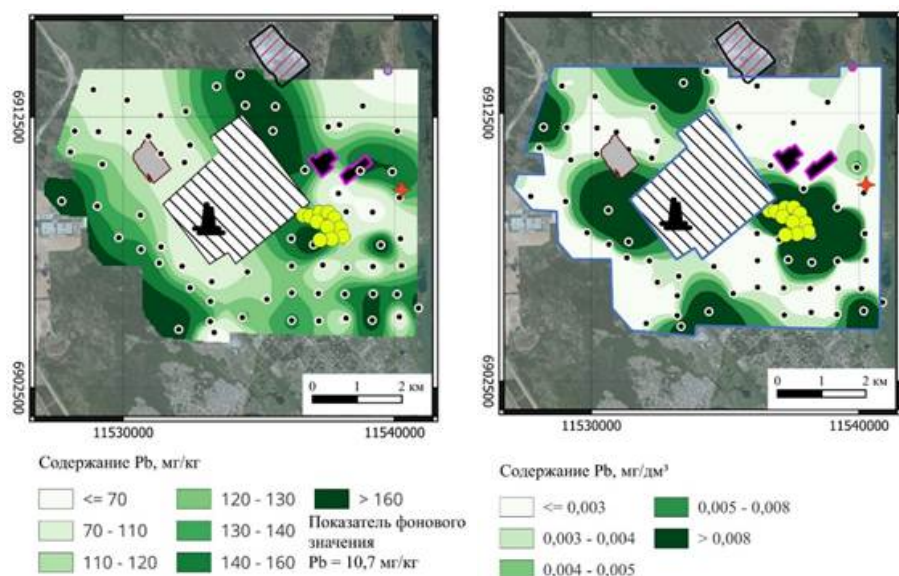


Рис. 6. Карты распределения нерастворимых (слева) и растворимых (справа) соединений свинца в пробах снега

Из карты распределения свинца в твердом остатке на рис 6. видно, что основные

аномалии по нему расположены в северной части бывшей промплощадки «Усольехимпрома» в направлении шламонакопителя и в юго-западной части изученной территории на стыке лесной зоны и садоводческих участков. Превышение фона в этих аномалиях – более 15 раз. Аномалии свинца в талой воде имеют мозаичный характер и контрастируют с остальной территорией не более, чем в 3 раза. Зоны с повышенным содержанием свинца в твердом остатке и жидкой фазе между собой не повторяются, а скорее наоборот – зоны аномальные по твердому осадку соответствуют фоновым значениям в пробах талой воды.

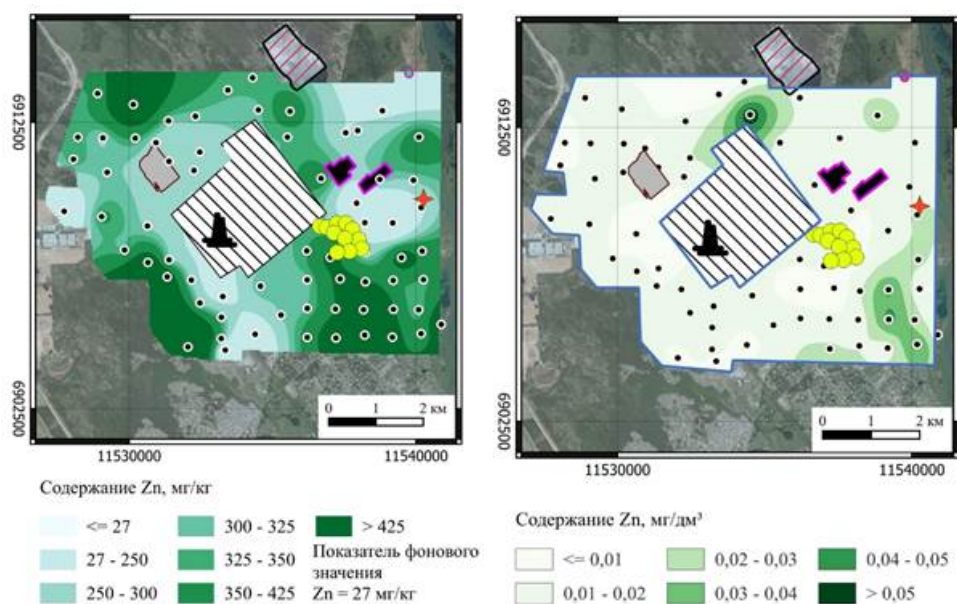


Рис. 7. Карты распределения нерастворимых (слева) и растворимых (справа) соединений цинка в пробах снега

Из рис. 7. по карте распределения цинка в твердом остатке видно, что зон с концентрациями в пределах фона довольно мало. Основных аномалий с превышением фона в 15,5 раз две. Одна из них практически совпадает с аномалией по мышьяку в нерастворимом остатке (рис. 5) и расположена на территории садоводств вдоль автодороги «Байкал» и железнодорожных путей. Вторая аномалия находится в юго-юго-восточной зоне – это одноэтажная застройка частного сектора г. Усолье-Сибирское. По талой воде ярких выраженных превышений фоновой концентрации не выявлено.

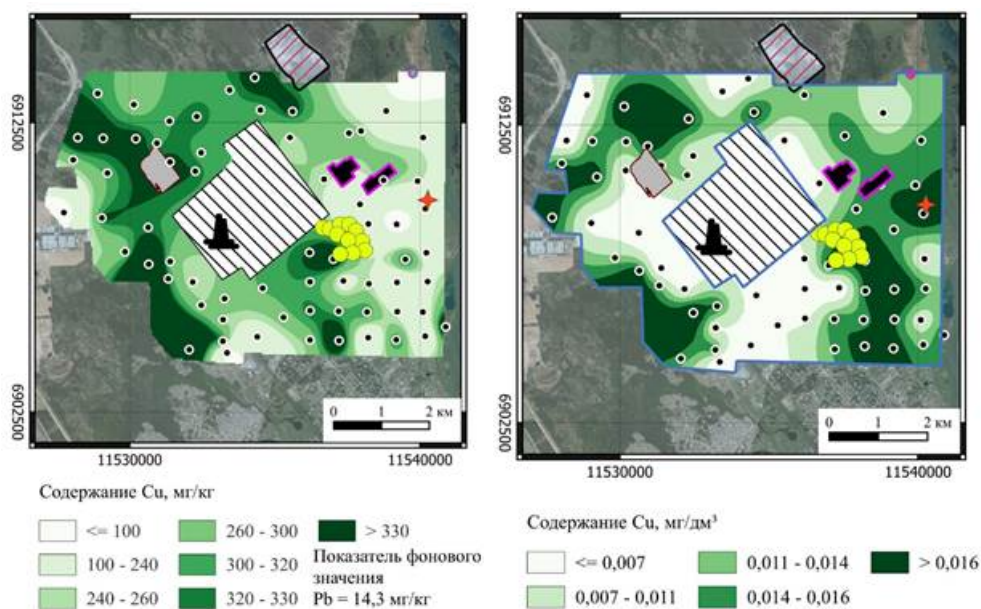


Рис. 8. Карты распределения нерастворимых (слева) и растворимых (справа) соединений меди в пробах снега

На рис. 8. представлены карты распределения меди в твердом остатке и талой вод. Из карты в твердой фазе видно, что одна из основных аномалий снова расположена на территории садоводств района «Зеленый городок» вдоль автодороги «Байкал» и железнодорожных путей, где и аномалии по мышьяку и цинку (рис. 4 и 6). Вторая аномалия расположена к северо-западу от ж/д станции «Мальтинка» и Усолье-Сибирского химико-фармацевтического завода. Превышения в аномалиях составляют от 23 фоновых концентраций. В талой снежной воде аномалия в садоводствах вдоль автодороги «Байкал» также выявлена, однако со значительно меньшим превышением фона – чуть более 4 раз. Вторая аномалия находится в частном секторе в юго-восточной части обследованной территории.

Из второй ассоциации элементов, выделенной в ходе факторного анализа, представлены карты распределения никеля и кобальта в твердом остатке на фильтрах (рис. 9), в талой воде концентрации этих элементов не определялись. Основная зона загрязнения никелем и кобальтом расположена в южной части исследуемой территории и относится к промышленной зоне Центрального района г. Усолье-Сибирское, включающей ООО «Усольский металлургический завод», ООО «Холдинг АРС» и другие производственные компании. Превышение фона по никелю тут более 9 раз, по кобальту – более 6 раз. Кроме этого, у никеля обнаружена аномалия к северо-западу от бывшей промплощадки «Усольехимпрома», затрагивающая действующий промышленный узел, включая территорию Усолье-Сибирского химико-фармацевтического завода.

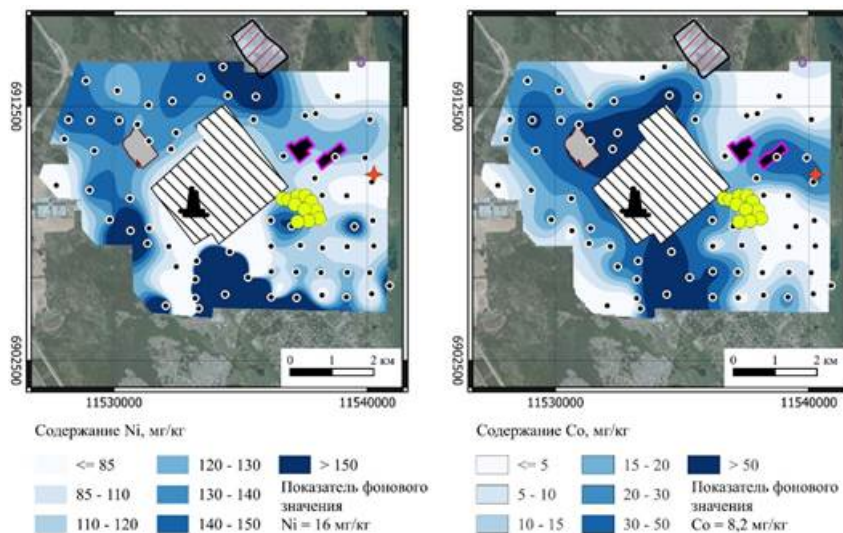


Рис. 9. Карты распределения нерастворимых соединений никеля и кобальта в пробах снега

Заключение

Полученные результаты позволяют детально охарактеризовать техногенную нагрузку на атмосферный воздух в г. Усолье-Сибирское в преддверии строительства и функционирования новых промышленных объектов. Таким образом сформирован фон для последующих программ геоэкологических наблюдений.

Выявлены основные зоны и уровни техногенной нагрузки, пространственно приуроченные к таким действующим предприятиям как ООО «Усольский металлургический завод», ООО «Холдинг АРС», автодороги «Байкал» и

железнодорожных путей, объектам, находящимся в процессе рекультивации - территория бывшей промплощадки «Усольехимпрома»,

Сопоставлены результаты анализа снеговой воды (растворимые формы поллютантов) и сухого осадка. Несмотря на то, что оба способа являются скорее взаимодополняющими, следует отметить высокую информативность исследований твердой фазы, несмотря на применение максимально простого и экспрессного метода анализа с помощью портативной XRF-аппаратуры. Так, такие значимые особенности как ассоциации загрязнителей, приуроченные к определенным источникам и формирующие локальные техногенные аномалии, были выявлены именно по результатам анализа твердой фазы. Это формирует методический базис для быстрых, недорогих и экологичных методов геоэкологических наблюдений за качеством атмосферы во всех «зимних» городах, поскольку в случае РФА по существу не требуются сложные методы пробоподготовки, химии высокой квалификации, специальные помещения и гораздо более дорогая аппаратура.

Библиография

1. Соловьянов А. А. Прошлый (накопленный) экологический ущерб: проблемы и решения. О ртутном загрязнении в Западной Сибири // Экологический вестник России. - 2016. - № 4. - С. 22-30. - EDN VUSW XF.
2. Коваль, П. В. И др. Антропогенная компонента и баланс ртути в экосистеме Братского водохранилища / П. В. Коваль, Г. В. Калмычков, С. М. Лавров [и др.] // Доклады Академии наук. - 2003. - Т. 388, № 2. - С. 225-227. - EDN OPTLRX.
3. Пастухов М. В., Полетаева В. И., Бутаков Е. В. Распределение ртути в шламонакопителе "УСОЛЬЕХИМПРОМ" и его влияние на окружающую среду // Географические основы и экологические принципы региональной политики природопользования: материалы Международной научно-практической конференции, Иркутск, 23-27 сентября 2019 г. - Иркутск: Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2019. - С. 553-556. - EDN MWSZPK.
4. Алиева, В. И. Гидрохимическая характеристика реки Ангары в районе влияния Усольского промышленного узла / В. И. Алиева, М. В. Пастухов // География и природные ресурсы. - 2012. - № 1. - С. 68-73. - EDN PXJFVV.
5. Poletaeva V. I., Pastukhov M. V., Tirsikh E. N. Dynamics of trace element composition of Bratsk Reservoir water in different periods of anthropogenic impact (Baikal Region, Russia) // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. - 2021. - Vol. 80, no. 3. - P. 531-545. DOI: 10.1007/s00244-021-00819-1 EDN: AHFFWA.
6. Особенности техногенного загрязнения и формы переноса ртути в Братском водохранилище / В. И. Алиева, Е. В. Бутаков, М. В. Пастухов, Л. Д. Андрулайтис // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. - 2011. - № 5. - С. 431-438. - EDN ODXIAL.
7. Полетаева, В. И. Влияние сточных вод Усольской промзоны на гидрохимический состав р. Ангара / В. И. Полетаева, М. В. Пастухов // Эколого-географические проблемы регионов России: материалы VII всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвящённой 105-летию со дня рождения исследователя Самарской Луки, к.г.н. Г.В. Обедиентовой, Самара, 15 января 2016 года / отв. ред. И.В. Казанцев. - Самара: Поволжская государственная социально-гуманитарная академия, 2016. - С. 74-77. - EDN VLOBNT.
8. Полетаева, В. И. Особенности поведения техногенных элементов в экосистеме Братского водохранилища / В. И. Полетаева, М. В. Пастухов // Современные проблемы регионального развития: Тезисы VI Международной научной конференции, Биробиджан, 04-06 октября 2016 года / Под редакцией Е. Я. Фрисмана. - Биробиджан: Институт

комплексного анализа региональных проблем Дальневосточного отделения РАН, 2016. - С. 153-156. - EDN XRTDMZ.

9. Пастухов, М. В. Аккумуляция техногенной ртути в донных отложениях седиментационного барьера Братского водохранилища / М. В. Пастухов, В. И. Полетаева // Ртуть и другие тяжелые металлы в экосистемах. Современные методы исследования содержания тяжелых металлов в окружающей среде: Тезисы Всероссийской научной конференции и школы-семинара для молодых ученых, аспирантов и студентов, Череповец, 14-16 мая 2018 года / Отв. ред. Е. С. Иванова. - Череповец: Череповецкий государственный университет, 2018. - С. 49-50. - EDN XRFOTJ.

10. Kholodova M. S., Poletaeva V. I., Pastukhov M. V. Features of the microelement composition of the liquid phase in snow cover from the towns of Usolye-Sibirskoe and Svirsk // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2019. - Vol. 381. - P. 012041. - DOI: 10.1088/1755-1315/381/012041.

11. Tsvetkova, E. A. Dynamics of mercury concentrations in wastewater from the Usolye-Sibirskoye industrial zone in periods with different technogenic loads / E. A. Tsvetkova, V. I. Poletaeva, M. V. Pastukhov // Limnology and Freshwater Biology. - 2022. - No. 3. - P. 1346-1348. - DOI 10.31951/2658-3518-2022-A-3-1346. - EDN IWNVST.

12. Пастухов, М. В. Химический состав планктона как показатель загрязнения Братского водохранилища / М. В. Пастухов, В. И. Полетаева // Современные направления развития геохимии: материалы Всероссийской конференции (с участием зарубежных ученых), посвящённой 65-летию Института геохимии им. А. П. Виноградова и 105-летию со дня рождения академика Л. В. Таусона, Иркутск, 21-25 ноября 2022 года. - Иркутск: Институт географии им. В. Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. - С. 80-84. - EDN PXSOL.

13. Минерально-вещественный состав твердого осадка снегового покрова в различных функциональных зонах Г. Усолье-Сибирское / М. С. Холодова, М. В. Пастухов, В. А. Бычинский [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2022. - Т. 333, № 9. - С. 219-230. - DOI 10.18799/24131830/2022/9/3687. - EDN IXLWDW.

14. Особенности микроэлементного состава снегового покрова Г. Усолье-Сибирское / М. С. Холодова, С. Н. Просекин, Э. Н. Тирских, П. Г. Долгих // Геоморфология и физическая география Сибири в XXI веке: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного работника высшей школы Российской Федерации, почетного члена Русского географического общества, профессора, доктора географических наук Земцова Алексея Анисимовича, Томск, 18-19 февраля 2020 года. - Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2020. - С. 150-153. - EDN TYQZFN.

15. Савченков, К. С. Содержание ртути в почвах Усольской промышленной зоны и прилегающей к ней территории / К. С. Савченков, М. В. Пастухов // Проблемы трансформации естественных ландшафтов в результате антропогенной деятельности и пути их решения: Сборник научных трудов по материалам Международной научной экологической конференции, посвященной Году науки и технологий, Краснодар, 29-31 марта 2021 года. - Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, 2021. - С. 425-428. - EDN EMOSEM.

16. Gordeeva, O. Mercury bioaccumulation by higher plants and mushrooms around chlor-alkali and metallurgical industries in the Baikal region, Southern Siberia, Russia / O. Gordeeva, G. Belogolova, M. Pastukhov // Chemistry and Ecology. - 2021. - Vol. 37, No. 8. - P. 729-745. - DOI 10.1080/02757540.2021.1972983. - EDN NYMUER.

17. Азовский, М. Г. Уровень накопления ртути в водных растениях как показатель загрязнения водоемов / М. Г. Азовский, М. В. Пастухов, В. И. Гребенщикова // Вода:

химия и экология. - 2010. - № 8(26). - С. 20-24. - EDN MUQHVD.

18. Пастухов, М. В. Биогеохимические особенности накопления ртути планктоном Братского водохранилища (Прибайкалье) / М. В. Пастухов, В. И. Гребенщикова, Н. Г. Шевелева // Проблемы региональной экологии. - 2009. - № 1. - С. 42-47. - EDN KARXFT.

19. Биоаккумуляция ртути в пищевых цепях окуня Иркутского и Братского водохранилищ / М. В. Пастухов, В. И. Гребенщикова, О. С. Рязанцева, В. И. Алиева // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды Междунар. науч.-практ. конф., Пермь, 26-28 мая 2009 г. В 2 т. Т. 2. - Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2009. - С. 335-340. - EDN HRQLDT.

20. Гигиеническая оценка содержания ртути в атмосферном воздухе на территории промышленной площадки города Усолье-Сибирское / Т. И. Кучерская, Л. А. Аликбаева, М. Ю. Комбарова [и др.] // Актуальные вопросы гигиены: сб. науч. тр. IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 17 февр. 2024 г. - СПб.: Сев.-Зап. гос. мед. ун-т им. И. И. Мечникова, 2024. - С. 133-137. - EDN GVHKBL.

21. Кучерская, Т. И. Гигиеническая оценка загрязнения почв ртутью на территории промышленной площадки г. Усолье-Сибирское / Т. И. Кучерская, Л. А. Аликбаева, М. Ю. Комбарова // Профилактическая медицина - 2022: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 30 нояб. - 01 дек. 2022 г. / под ред. А. В. Мельцера, И. Ш. Якубовой. - СПб.: Сев.-Зап. гос. мед. ун-т им. И. И. Мечникова, 2022. - С. 153-156. - EDN DRBCIQ.

22. Алыкова, О. И. Накопленный экологический вред: проблемы и последствия. Сообщение 2. Анализ ситуации / О. И. Алыкова, Л. Ю. Чуйкова, Ю. С. Чуйков // Астраханский вестник экологического образования. - 2021. - № 2(62). - С. 114-137. - DOI 10.36698/2304-5957-2021-2-114-137. - EDN FMUSDM.

23. Петрова, А. С. Реализация экологических проектов Госкорпорацией "Росатом" / А. С. Петрова // Теоретическая и прикладная экология. - 2023. - № 4. - С. 28-34. - DOI 10.25750/1995-4301-2023-4-028-034. - EDN LQZLNV.

24. Глава "Росатома" Алексей Лихачев и зампредправления РФ Дмитрий Патрушев посетили промплощадку "Усольехимпрома" [Электронный ресурс]. - URL: <https://atommedia.online/2024/10/01/glava-rosatoma-aleksey-lihachev-i-za/> (дата обращения: укажи сам при необходимости).

25. Цветкова, Е. А. Гидрохимическая характеристика р. Ангара в условиях воздействия промышленной зоны (г. Усолье-Сибирское) / Е. А. Цветкова, В. И. Полетаева // Геология на окраине континента: матер. II молодеж. науч. конф.-школы ДВГИ ДВО РАН, Владивосток, 12-16 сент. 2022 г. - Владивосток: Дальневост. федер. ун-т, 2022. - С. 218-221. - EDN VCSHNQ.

26. Цветкова, Е. А. Характеристика сточных вод промышленной зоны г. Усолья-Сибирского и их влияние на гидрохимический состав р. Ангара в периоды с разной техногенной нагрузкой / Е. А. Цветкова, В. И. Полетаева, М. В. Пастухов // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. - 2024. - Т. 335, № 5. - С. 39-58. - DOI 10.18799/24131830/2024/5/4314. - EDN FHXWIE.

27. Полетаева, В. И. Техногенное воздействие сточных вод на гидрохимический состав р. Ангара / В. И. Полетаева, М. В. Пастухов // Теоретическая и прикладная экология. - 2022. - № 3. - С. 90-95. - DOI 10.25750/1995-4301-2022-3-090-095. - EDN EBRLIR.

28. Цветкова, Е. А. Оценка воздействия промышленных сточных вод на качество вод реки Ангара в период снижения техногенной нагрузки / Е. А. Цветкова, В. И. Полетаева // Экология родного края: проблемы и пути их решения: матер. XVII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Киров, 26-27 апр. 2022 г. Кн. 1. - Киров: Вят. гос. ун-т, 2022. - С. 253-258. - EDN MQUGAY.

29. Цветкова, Е. А. Трансформация гидрохимического состава вод р. Ангара в зоне

- воздействия техногенных источников / Е. А. Цветкова, В. И. Полетаева, В. А. Бычинский // Современные направления развития геохимии: матер. Всерос. конф. (с участием зарубеж. ученых), посвящ. 65-летию Ин-та геохимии им. А. П. Виноградова и 105-летию акад. Л. В. Таусона, Иркутск, 21-25 нояб. 2022 г. - Иркутск: Ин-т географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2022. - С. 201-203. - EDN IHWDIJ.
30. Цветкова, Е. А. Концентрации микроэлементов в талых водах промышленной зоны г. Усолье-Сибирское / Е. А. Цветкова // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXVII Междунар. молодеж. науч. симпоз. им. акад. М. А. Усова, посвящ. 160-летию акад. В. А. Обручева и 140-летию акад. М. А. Усова, Томск, 03-07 апр. 2023 г. - Томск: Нац. исслед. Том. политехн. ун-т, 2023. - С. 264-266. - EDN QULSNO.
31. Цветкова, Е. А. Основной ионный состав талых вод промышленной зоны г. Усолье-Сибирское / Е. А. Цветкова, В. И. Полетаева, М. В. Пастухов // Науки о Земле. Современное состояние: материалы VI Всероссийской молодежной научно-практической школы-конференции, п. Жемчужный, Геологический полигон "Шира", 30 июля - 5 августа 2023 г. - Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2023. - С. 169-171. - EDN DAMWAT.
32. Рапута, В. Ф. Анализ выносов ртути с промплощадки "Усольехимпрома" / В. Ф. Рапута, Р. А. Амикишиева, Т. В. Ярославцева // Интерэкспо Гео-Сибирь. - 2021. - Т. 4, № 1. - С. 193-198. - DOI 10.33764/2618-981X-2021-4-1-193-198. - EDN NJBBUG.
33. Кучерская, Т. И. Оценка содержания ртути в почве на территории промышленной площадки г. Усолье-Сибирское / Т. И. Кучерская, М. Ю. Комбарова // Медико-биологические аспекты химической безопасности: сборник научных трудов V Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 27-29 сентября 2023 г. - СПб.: НИИ гигиены, профпатологии и экологии человека ФМБА, 2023. - С. 41-42. - EDN HNLEZW.
34. Государственный доклад "О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2023 году". - Иркутск: ООО "Максима", 2024. - 308 с. : ил.
35. Официальный сайт администрации города Усолье-Сибирское. Перечень предприятий, оказывающих НВОС на территории города [Электронный ресурс]. - URL: <https://usolie-sibirskoe.ru/ekologiya/monitoring-atmosfernogo-vozdukha-rospotrebnadzor> (дата обращения: 10.04.2025).
36. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году: проект Государственного доклада. - М.: Минприроды России; ООО "Интеллектуальная аналитика"; ФГБУ "Дирекция НТП"; Фонд экологического мониторинга и международного технологического сотрудничества, 2024. - 707 с.
37. Федеральный центр химии [Электронный ресурс]. - URL: <http://fcc.pi-school.ru/> (дата обращения: 10.04.2025).
38. Иванова, У. С. Принципы приращения национального благосостояния на примере разработки Федерального центра химии в г. Усолье-Сибирское / У. С. Иванова, Ю. В. Зворыкина, М. В. Василькова, А. В. Олейник // Прогрессивная экономика. - 2024. - № 1. - С. 32-54. - DOI 10.54861/27131211_2024_1_32. - EDN ZWFRVQ.
39. Белозерцева, И. А. Загрязнение атмосферы и содержание фтора в снеге на акватории оз. Байкал / И. А. Белозерцева, И. Б. Воробьева, Н. В. Власова [и др.] // Современные проблемы науки и образования. - 2015. - № 2-2. - С. 735. - EDN UZJITD.
40. Носова, О. В. Мониторинг снежного покрова селитебной зоны г. Норильска / О. В. Носова, А. В. Каверзин // Культура. Наука. Производство. - 2019. - № 4. - С. 30-36. - EDN ZPFUYT.
41. Даунов, Б. Я. Мониторинг загрязнения атмосферы и снежного покрова с целью предотвращения ЧС техногенного характера / Б. Я. Даунов // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. - 2018. - Т. 1. - С.

159-161. - EDN YXLNIL.

42. Мищенко, О. А. Мониторинг состояния снежного покрова на территории Хабаровского края / О. А. Мищенко, А. А. Шелганова // Отходы и ресурсы. - 2022. - Т. 9, № 3. - DOI 10.15862/11ECOR322. - EDN QUVJWR.

43. Асфандиярова, Л. Р. Анализ состояния атмосферного воздуха при помощи мониторинга снежного и почвенного покрова / Л. Р. Асфандиярова, Т. З. Забиров, А. Р. Байтимиров // Решение. - 2020. - Т. 1. - С. 62-64. - EDN HSUPQW.

44. Новороцкая, А. Г. О результатах химического мониторинга снежного покрова Хабаровска / А. Г. Новороцкая // Успехи современного естествознания. - 2018. - № 12-2. - С. 374-379. - EDN MLQEPB.

45. Афоина, Т. Е. Мониторинг загрязнения снежного покрова углеводородными соединениями / Т. Е. Афоина // Вестник ИрГСХА. - 2023. - № 117. - С. 8-18. - DOI 10.51215/1999-3765-2023-117-8-18. - EDN QTVVEV.

46. Ломсков, М. А. Мониторинг содержания тяжелых металлов в снежном покрове отдельных участков трех парковых территорий Москвы / М. А. Ломсков, А. М. Коновалов, К. И. Шурухт // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер. Естественные и технические науки. - 2022. - № 3. - С. 27-29. - DOI 10.37882/2223-2966.2022.03.23. - EDN DJIKSU.

47. Гончар, Н. В. Снеговая съемка в пределах месторождений медных руд в горнопромышленных районах Урала / Н. В. Гончар, А. Б. Макаров, О. М. Гуман, И. А. Антонова // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. - 2024. - Т. 27, № 2. - С. 158-169. - DOI 10.21443/1560-9278-2024-27-2-158-169. - EDN KTHGKZ.

48. Ермолов, Ю. В. Вклад выбросов металлургии в пылеаэрозольное загрязнение Норильского промышленного района по снегогеохимическим данным / Ю. В. Ермолов, И. Д. Махатков, А. С. Черевко // Оптика атмосферы и океана. - 2023. - Т. 36, № 2 (409). - С. 93-99. - DOI 10.15372/AOO20230203. - EDN MYUNFY.

49. Филимонова, Л. М. Оценка загрязнения атмосферы в районе алюминиевого производства методом геохимической съемки снежного покрова / Л. М. Филимонова, А. В. Паршин, В. А. Бычинский // Метеорология и гидрология. - 2015. - № 10. - С. 75-84. - EDN UYCNVJ.

50. Кузнецова О. В., Качор О. Л., Матюхин И. А., Икрамов З. Л., Паршин А. В. Экспрессный рентгенофлуоресцентный анализ как современная альтернатива традиционным спектральным методам при решении задач геохимических поисков. Науки о Земле и недропользование. - 2023. - Т. 46, № 4. - С. 390-401. - DOI 10.21285/2686-9993-2023-46-4-390-401. - EDN XMXYIB.

51. Качор, О. Л. О результатах исследований качества атмосферного воздуха в микрорайоне Иркутск-2 и поселке Боково (юго-западное Прибайкалье) методом снегогеохимической съемки / О. Л. Качор, А. В. Паршин, З. Л. Икрамов, В. В. Трусова, А. В. Курина // Науки о Земле и недропользование. - 2025. - № 1. - DOI 10.13140/RG.2.2.33094.59201.

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Предметом исследования является оценка качества атмосферного воздуха в районе будущего экотехнопарка "Восток" (г. Усолье-Сибирское, Иркутская область) по данным снегогеохимической съемки.

Актуальность изучения данного вопроса не вызывает сомнения. Исследования снежного покрова являются одним из универсальных способов контроля за состоянием приземной атмосферы, позволяющим дать комплексную характеристику состояния атмосферного воздуха и антропогенного загрязнения окружающей среды во многих «зимних» городах и районах. Особое значение на современном этапе развития систем экологического мониторинга и контроля имеет качество атмосферного воздуха. Воздух, как объект окружающей среды, оказывает наибольшее влияние на здоровье населения, т.к. контакт с ним непрерывен, и в случае загрязнения атмосферы поллютанты могут переноситься на значительные расстояния от источника воздействий. В г. Усолье-Сибирское и в районе будущего экотехнопарка "Восток" на состояние атмосферного воздуха оказывают влияние действующие в городе 34 промышленных предприятия и объекты ТЭК, приводя к очень высокому уровню загрязнения воздуха (бензапиреном, формальдегидом, взвешенными веществами и т.д.).

Поскольку Усолье-Сибирское расположено в северном регионе, с продолжительной зимой и устойчивым сезонным снежным покровом, то наиболее эффективным способом комплексной и детальной в геопространственном отношении оценки загрязнения воздуха является изучение распределения поллютантов в жидкой и твердой фазе сезонных проб снега, т.к. он адсорбирует из воздуха значительную часть загрязняющих веществ. По составу снежного покрова можно идентифицировать антропогенные источники воздействия.

Методология исследования основана на изучении распределения поллютантов в жидкой и твердой фазе сезонных проб снега (снегогеохимические исследования). В период максимального накопления влагозапаса в снежном покрове был проведен отбор проб снега с целью выявления загрязнения атмосферного воздуха в г. Усолье-Сибирское.

Пробоотбор снега производился с учётом требований ГОСТ Р 70282-2022 на участках размером от 5х5 м до 10х10 м методом «конверта». Пробы отбирали на всю мощность из шурфов лопатами из химически стойкого полимерного материала. Из отобранных проб с одного участка составлялась объединенная проба, весом не менее 10 кг, которая помещалась в емкость из химически стойкого полимерного материала (полиэтиленовый пакет) и маркировалась. Пробы снега доставлялись в лабораторию, где производили растапливание проб при комнатной температуре, отфильтровывали через фильтр "синяя лента" и анализировали твердый остаток после фильтрования.

Анализ твердого остатка после таяния снеговой воды проводился с использованием портативного рентгенофлуоресцентного анализатора SciAps серии X200 на 20 элементов. Химический анализ проб на содержание различных элементов в талой снеговой воде проводился на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) Thermo Scientific iCAP 6300DUO.

Научная новизна заключается в том, что авторы впервые анализировали не только талую снеговую воду районов загрязнения, но и твердый осадок снежного покрова. Таким образом получена информация не только о водорастворимых формах поллютантов (которые после таяния снега перейдут в почву), но и информация о нерастворимых формах загрязнителей, которые могут поступать в легкие человека в виде пыли. Результаты химико-аналитических исследований проб твердого остатка на фильтрах были подвергнуты математическому анализу для оценки качества получаемого химико-аналитического результата.

Стиль статьи – научный, по объёму соответствует требованиям журнала. Статья имеет табличный и иллюстративный материал (карты распределения загрязнителей). Исследования выполнены в течение 2023-2024 гг. Все представленные картографические материалы подготовлены в системе координат EPSG 3395 (Эллипсоид WGS 84 / Проекция World Mercator). На основе полученных данных сопоставлены

результаты анализа снеговой воды (растворимые формы поллютантов) и сухого осадка, выявлены основные зоны и уровни техногенной нагрузки, пространственно приуроченные к таким действующим предприятиям как ООО «Усольский металлургический завод», ООО «Холдинг АРС», автодороги «Байкал» и железнодорожных путей, объектам, находящимся в процессе ре-культивации - территория бывшей промплощадки «Усольехимпром».

В статье имеются незначительные опечатки, например в заключении, во втором абзаце «...территория бывшей промплощадки «Усольехимпрома»...) в слове «промплощадки» имеется опечатка.

Библиография статьи достаточно объёмная и включает в себя 51 литературный источник, что слишком «перегружает» данную статью.

Например, только в абзаце: «О негативном влиянии бывшей промплощадки на различные объекты окружающей среды свидетельствуют многочисленные работы, посвященные изучению микро- и макроэлементного состава воды, донных отложений, фитопланктона, зоопланктона, рыбе Братского водохранилища, почвы, снегового покрова, сточных и талых вод с промплощадки, накоплению ртути высшими растениями, грибами, водными растениями [6-21]», автор делает ссылку сразу на 15 источников. Достаточно было ограничиться наиболее значимыми источниками. Не все источники оформлены согласно требованиям (в источнике №50 не отмечен год издания).

Выводы в статье имеют обобщенный характер и не совсем отражают результаты исследований по оценке качества атмосферного воздуха в районе будущего экотехнопарка "Восток". Желательно их конкретизировать и подтвердить некоторыми экспериментальными данными. Хотя автор приходит к выводу, что полученные результаты позволяют детально охарактеризовать техногенную нагрузку на атмосферный воздух в г. Усолье-Сибирское в преддверии строительства и функционирования новых промышленных объектов.

Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на использованные литературные источники и выражении авторского мнения по изучаемой проблеме. Рецензируемая статья несомненно будет интересна и полезна широкому кругу ученых и специалистов в области экологии Арктических регионов.

Данная статья рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика» после незначительной доработки.

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Васильчук Ю.К. Концентрация основных растворимых ионов в ядре булгуннях на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха, юг Тазовского полуострова // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.74286 EDN: FTUSYM URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74286

Концентрация основных растворимых ионов в ядре булгуннях на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха, юг Тазовского полуострова

Васильчук Юрий Кириллович

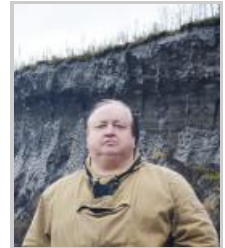
ORCID: 0000-0001-5847-5568

доктор геолого-минералогических наук

профессор; кафедра геохимии ландшафтов и географии почв; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

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

✉ vasilch_geo@mail.ru



[Статья из рубрики "Многолетнемерзлые породы и подземные льды Арктики, Антарктики и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.2.74286

EDN:

FTUSYM

Дата направления статьи в редакцию:

30-04-2025

Дата публикации:

15-05-2025

Аннотация: Автором описано более 20 булгунняхов на месторождении Песцовое, в 10-15 км севернее ст. Тундра, в 98-103 км от г.Новый Уренгой. Высота булгунняхов колеблется в основном от 15 до 20 м, диаметр составляет 150-200 м. Чаще всего в их профиле выделяется пьедестал, высотой около 5-7 м, над которым куполообразно возвышается основной бугор. На одном из бугров, высотой 17 м в 10 км севернее ст. Тундра выполнено более детальное датирование перекрывающего торфа, свидетельствующее о том, что эти булгунняхы формировались сравнительно недавно, во всяком случае не ранее 2,5 тыс. лет назад. Для определения возраста булгунняхы был опробован торф, перекрывающий бугор в центральной части и близ подножия на

пьедестале. Отбор образцов льда из ядра булгунняха, производился зимой 2013 г. Измерения макрокомпонентного состава льда проводились с помощью ионного хроматографа «Стайер» (Россия), предел детектирования по хлорид-иону 0,02 мг/л. Радиоуглеродное датирование торфа, продемонстрировало относительно молодой возраст перекрывающего торфа в разных частях бугра. В центральной части булгунняха поверхностный торф датирован в 2560 ± 70 лет, торф с глубины 0,3-0,4 м датирован в 5220 ± 50 лет и торф с глубины 0,85-0,9 м имеет возраст 5080 ± 50 лет. На пьедестале торф с глубины 0,05-0,15 м датирован в 5400 ± 40 лет. Во льду ядра булгунняха были определены ионы калия, натрия, кальция, магния, хлора, сульфатов и нитратов. В растворенной форме в изученном инъекционном льду среди катионов доминируют ионы натрия (от 1,5 до 4 мг/л), на втором месте ионы калия (от 0,5 до 2,1 мг/л). Среди анионов преобладает хлор-ион (от 0,6 до 3,3 мг/л), на втором месте сульфат-ион (от 0,3 до 1 мг/л). Отношение хлор-ионов к сульфат-ионам варьирует от 0,7 до 3,7, составляя в среднем 1,7.

Ключевые слова:

растворимые ионы, анионы, катионы, макроэлементы, булгуннях, ледяное ядро, многолетнемерзлые породы, река Евояха, Песцовое, север Западной Сибири

Исследования выполнены в рамках госбюджетной темы 1.4. "Антропогенная геохимическая трансформация компонентов ландшафтов" (№ ЦИТИС 121051400083-1, при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №23-17-00082: "Палеоциклы углерода-азота в экосистемах бугристых и полигональных торфяников, едомы и в пластовых льдах на севере России))."

Введение

Макроэлементный состав подземных льдов формируется при совокупном влиянии ионного состава вод, сформировавших эти льды, и макрокомпонентного состава вмещающих льды отложений. Например, подземные льды в кимберлитовых трубках западной Якутии имеют разный ионный состав благодаря тому, что вмещающие их породы содержат существенно различающееся количество анионов и катионов.^[1,2]

Булгунняхи (синоним пинго) могут находиться под значительным давлением, приводящим к взрывным разрушениям^[3]. Н.С.Богомолов и А.Н.Скляревская^[4] описали случай, когда крупные обломки льда размером до 0,7 x 1,5 x 2 м были разбросаны на расстояние 2-8 м, а более мелкие ледяные фрагменты на расстояние до 20 м. Взрыв сопровождался на протяжении 30 минут выбросом струи воды высотой до 1,5 м. По наблюдениям Росс Маккая из некоторых пинго вместе с небольшим количеством воды выделяются негорючие газы.^[5]

В 1825 г. Дж. Франклин сделал самое раннее описание пинго, когда поднялся на небольшой пинго на острове Эллис в дельте Маккензи. В 1938 г. термин пинго был впервые заимствован у местного населения арктическим ботаником А.Э.Порсилдом в его статье о пинго западного арктического побережья Канады и Аляски (пинго Порсилд в Тактояктук назван в его честь). Термин пинго, который у индейцев означает конический холм, сейчас принят в качестве научного термина в англоязычной литературе.

Возраст пинго в двух районах на острове Бэнкс, Канадская Арктика, отстоящих друг от

друга на 150 км, по радиоуглеродной оценке, равен примерно от 4500 до 7000 лет. Такие датировки поддерживают точку зрения о росте пинго во время похолодания в начале голоцена. Датирование отложений в пинго на Шпицбергене, в дельте Маккензи и на Аляске дало лишь представление о максимальном возрасте, практически везде это был голоцен. Данные о минимальном возрасте пинго, за исключением самых молодых форм, в целом малочисленны, но можно принять, что он составляет первые тысячи и даже сотни лет. Наивысшая годовая скорость роста пинго, определенная Росс Маккаем, достигала 21,2 см/год. В первые год или два развития возможна скорость до 1,5 м/год, но в дальнейшем она уменьшается пропорционально корню квадратному от возраста.^[5] По наблюдениям Росс Маккая вертикальная скорость роста одного из пинго, на вершине которого была открыта дилатационная трещина шириной 0,5-1,5 см и глубиной 15-18 м, равнялась примерно 15 см/год в течение 1969-1971 гг. В дельте Маккензи известны пинго высотой около 6 м, которые образовались после 1935 г. вслед за отступанием берега, вызвавшего спуск озера. Другие пинго возникли после 1950 г.

По мнению В.Н.Сукачева, возраст ряда пинго в Сибири колеблется от 106 до 162 лет.

Э.Бибус упоминает радиоуглеродную датировку 1875 ± 470 лет назад, интерпретируемую им как минимальный возраст. Он также, указывая на Х.Свенссона, называет цифру 2400 лет, хотя у Х.Свенссона^[6] эта дата равна 2650 ± 55 лет и цитируется как максимальный возраст. В отношении самого высокого в арктической Канаде пинго Ибюк (высотой более 50 м, этот пинго отнесен к национальным достопримечательностям Канады), оценивавшегося Ф.Мюллером^[7] предположительно не старше 7000-10000 лет, исследования показывают, что он продолжает расти в высоту, примерно на 2 см в год, и расчеты, базирующиеся на темпах роста в 1973-1975 гг., дают основания полагать, что его возраст равен около 1000 лет.^[8]

Э.Олсон и У. Брёкер^[9] по образцу Б.Крейга, отобранному в 1955 г. из основания торфа с глубины 0,9 м на вершине пинго в долине р.Телон ($64^{\circ} 19' \text{ с.ш.}, 102^{\circ} 41' \text{ з.д.}$), Северо-Западные территории Канады получили ^{14}C датировку 5500 ± 250 (L-428).

В зоне практически сплошного распространения многолетнемерзлых пород и на севере более южной мерзлотной зоны широко распространены инъекционные бугры пучения, которые подразделяются на гидролакколиты и булгунняхы. В 1932 г. Н.И.Толстихин показал, что многолетние бугры пучения образуются в районах выхода восходящих источников и для таких форм ввел термин "гидролакколиты".^[10]

Гидролакколит представляет собой выпуклую мезоформу рельефа высотой до 25-30 и диаметром в 250-400 м, сложенную, как правило, глинистыми грунтами, возникающую при восходящем развитии многолетнемерзлых пород в результате внедрения напорных подземных вод и образования мощного инъекционного ледяного ядра. Булгунняхы чаще всего располагаются в районах новейших тектонических поднятий, в различных частях зоны сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Они установлены на юге Ямала, на севере Гыданского полуострова, детально исследованы в бассейне Ярудея (в пределах Орлиной структуры) и на юге Тазовского полуострова (Самбургская структура).^[11,12]

Якутским термином «булгуннях» обозначались небольшие изолированные естественные холмы независимо от их генезиса. Было замечено, что булгунняхы иногда постепенно вырастают среди низин, а в ядре их обнаруживается ископаемый лед. Это дало основание считать булгунняхы результатом пучения, а отсюда применять название

«булгуннях» только для обозначения многолетних бугров пучения. [13]

Цель данной работы изучить состав основных растворимых ионов в ядре пинго (булгуннях) на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха, юг Тазовского полуострова для определения источника образования льда;

Объекты и методы

Автором изучен гидрохимический состав льда, вскрытого в ядре пинго (булгуннях) на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха (рис. 1), на юге Тазовского полуострова. [14,15,16,17,18,19] В 10-15 км севернее станции Тундра (в 29-30 км после поворота на газовое месторождение Песцовое с основного шоссе), в 98-103 км от г. Новый Уренгой (66°10' с. ш. 76-77° в. д.) нами встречено более 20 булгунняхов (рис. 2). Высота исследованных булгунняхов колеблется в основном от 15 до 20 м, диаметр составляет 150-200 м.

Чаще всего в их профиле выделяется нижняя часть – пьедестал, высотой около 5-7 м, над которым куполообразно возвышается основной бугор (см. рис. 2,а).



Рис. 1. Местоположение булгуннях на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха

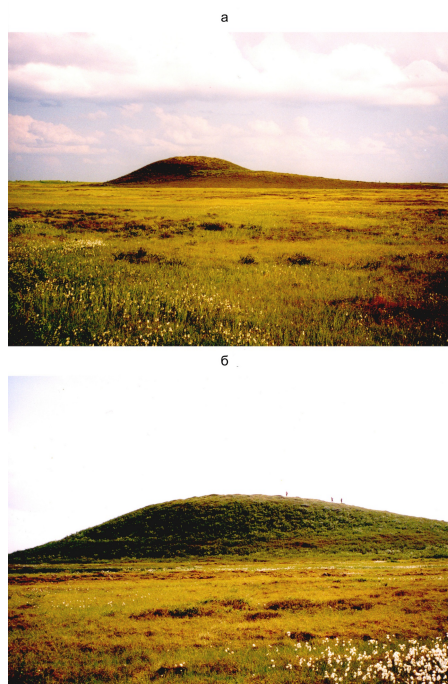


Рис. 2. Булгунняхы в районе месторождения Песцовое на юге Тазовского полуострова: а – с выраженным пьедесталом, б – высотой 17 м на вершине которого отобраны образцы для радиоуглеродных определений

На одном из бугров, высотой 17 м в 10 км севернее ст. Тундра (в 29-30 км после поворота на Песцовое с основного шоссе от г.Новый Уренгой) выполнено более детальное обследование (см. рис. 2,б). Для этого из 3 шурфов на вершине и склоне булгуннях, были отобраны образцы для радиоуглеродных определений, а зимой 2013 г. проведено бурение скважины глубиной до 30 м (рис. 3), для изучения внутреннего строения ледяного ядра и для отбора образцов на изотопно-гидрохимические определения. Мощные линзы льда в ядрах булгуннях встречены и в других районах Тазовского п-ова (рис. 4).[\[20\]](#)

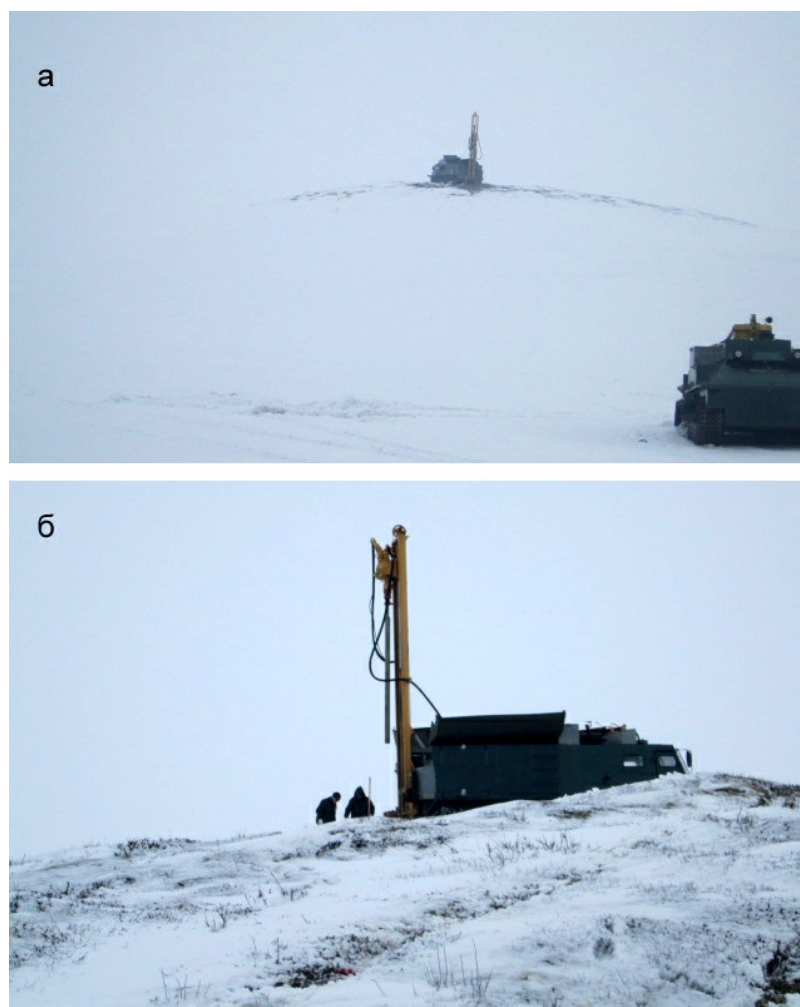


Рис. 3. Бурение булгуннях на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха

В разрезе бугра (рис. 4, а) вскрыты:

0,0-0,5 м. Торф темно-коричневый.

0,5- 0,9 м. Суглинок оторфованный темно-коричневый.

0,9- 12 м. Суглинок темно-серый плотный, с прослоями ожелезнения. Криотекстура массивная. В нижней части с глубины 10,2 м встречены мощные (до 5-7 см) горизонтальные шлиры льда.

12-12,7 м. Переслаивание суглинка и льда, толщина слоев льда 5-7 см, суглинка – 10-12 см.

12,7-27 м. Переслаивание мутного, прозрачного и молочно-белого льда (рис. 5). В интервале 20-22,5 м и 26-27 м встречены прослой суглинка толщиной 2-3 см.

27-35 м. Суглинок серый плотный, криотекстура неясно слоистая. На глубинах 27,8, 28,5 и 31,8 м встречены прослои льда толщиной 5-8 см.

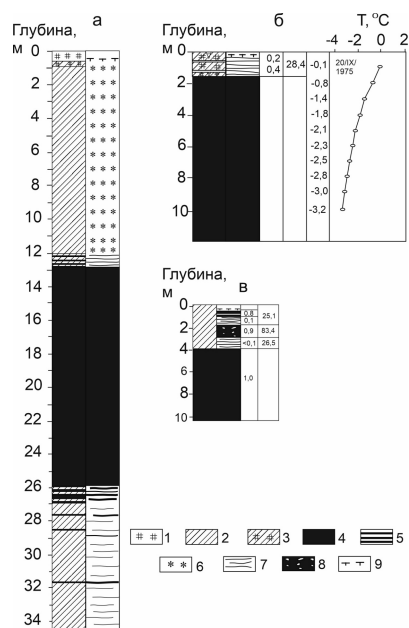


Рис. 4. Мощные линзы льда в ядрах булгунняхов на юге Тазовского п-ова: а – вершина исследованного булгунняха, высотой 17 м в районе месторождения Песцовое, в 10 км севернее ст. Тундра, б – в – из Геокриологические условия Западно-Сибирской газоносной провинции [20]: в – вершина булгунняха, высотой около 15 м на левом берегу р. Паровы-Хадуттэ, б – булгуннях (высотой около 7 м) с кочковатой полигональной тундрой на междуречье рек Табьяха и Еньяха: 1 – суглинок; 2 – торф; 3 – растительные остатки; 4 – инъекционный лёд; криогенная текстура сильнольдистых отложений: 5 – линзовидная и частошлировая, 6 – базальная

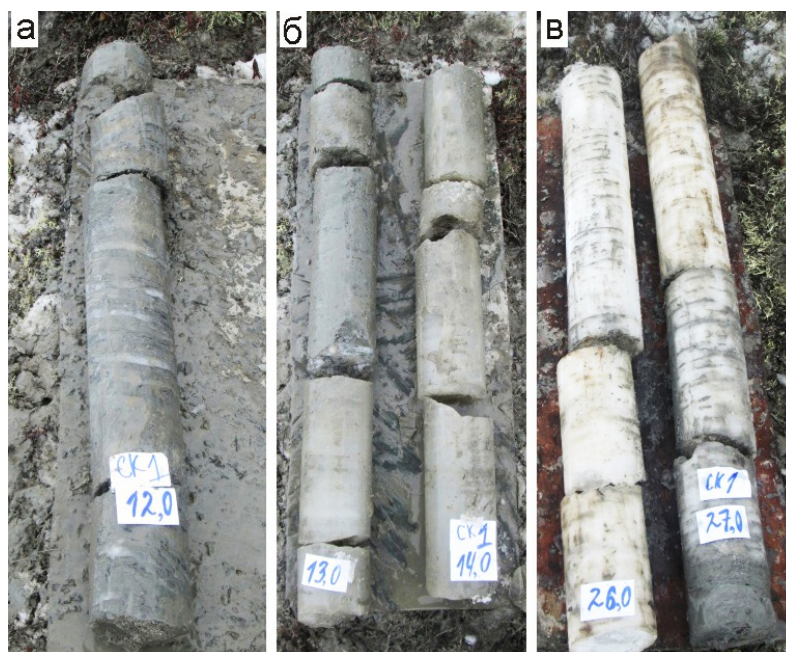


Рис. 5. Керн ледяного ядра булгунняха (с глубины от 12 до 27 м) на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха

Отбор образцов и пробоподготовка

Для определения возраста булгунняха был опробован торф, перекрывающий бугор в центральной части и близ подножия на пьедестале. Отбор образцов льда из ядра

булгуннях, производился зимой 2013 г.

Лабораторные методы

Измерения макрокомпонентного состава льда проводились с помощью ионного хроматографа «Стайер» (Россия), предел детектирования по хлорид-иону 0,02 мг/л. Ионный хроматограф «Стайер» предназначен для качественных и количественных определений неорганических соединений F^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} в водных растворах различного происхождения (природных, технических, питьевых).

Для льда из ядра булгуннях использована методика выполнения измерений массовой концентрации катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ в пробах питьевой, минеральной, природной и сточной воды методом ионной хроматографии ФР.1.31.2005.01738. Диапазон определяемых концентраций 0,10-20,00 мг/дм³, а для определения анионов - использована методика выполнения измерений массовой концентрации Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- в пробах питьевой, минеральной, природной и сточной воды методом ионной хроматографии ФР.1.31.2005.01724, Диапазон определяемых концентраций 0,10-20,00 мг/дм³ и методика выполнения измерений массовой концентрации ионов в пробах природной, питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии ПНД Ф 14.1:2:4.132-98. Диапазон определяемых концентраций по катионам 0,10-150,00 мг/дм³.

Радиоуглеродное датирование торфа, выполнено в Геологическом институте РАН с помощью Л.Д.Сулержицкого.

Результаты гидрохронологических определений

Радиоуглеродное датирование торфа, продемонстрировало относительно молодой возраст перекрывающего торфа в разных частях бугра. В центральной части булгуннях поверхностный торф датирован в 2560 ± 70 лет, торф с глубины 0,3-0,4 м датирован в 5220 ± 50 лет и торф с глубины 0,85-0,9 м имеет возраст 5080 ± 50 лет. На пьедестале торф с глубины 0,05-0,15 м датирован в 5400 ± 40 лет. [\[14\]](#)

Результаты гидрохимических определений

Во льду ядра булгуннях были определены концентрации макроэлементов: K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} . (табл. 1, рис. 6). Минимальные значения ЕС голоценового инъекционного льда составляют 15 $\mu S/cm$, максимальные 47 $\mu S/cm$ и средние 26 $\mu S/cm$. Лёд инъекционного ядра в основном пресный.

Таблица 1. Гидрохимический состав ледяного ядра пинго - булгуннях (с глубины от 12 до 27 м) Песцовое, в долине реки Евояха

Глубина, м	pH	мкСм/см	Na^+ , мг/л	K^+ , мг/л	Mg^{2+} , мг/л	Ca^{2+} , мг/л	Cl^- , мг/л	NO_3^- , мг/л	SO_4^{2-} , мг/л	Cl^- / SO_4^{2-}
12 м	6,33	42,4	4,12	1,85	0,35	1,00	3,34	0,25	0,91	3,67
13 м	6,57	19,94	2,27	0,91	0,28	0,64	1,09	0,20	0,70	1,56
14 м	6,02	15,74	1,96	0,92	0,27	0,62	0,79	0,13	0,64	1,23
15 м	6,16	15,84	1,51	0,55	0,18	0,75	0,90	0,20	0,54	1,67
16 м	6,14	47,1	2,14	0,97	0,25	0,61	0,60	0,11	0,77	0,78

17 м	6,35	16,67	1,95	0,91	0,25	0,83	0,64	0,26	0,86	0,74
18 м	5,96	21,3	2,31	1,09	0,19	0,56	0,73	0,14	0,97	0,75
20 м	6,3	37,8	3,04	2,10	0,27	0,68	1,81	0,16	0,74	2,45
21 м	6,28	24,6	2,06	1,04	0,27	0,58	0,87	0,31	0,60	1,45
22 м	6,12	19,21	1,55	0,48	0,37	0,68	0,65	0,23	0,26	2,50
23 м	6,13	37,7	2,91	1,70	0,34	0,95	1,77	0,26	0,85	2,08
24 м	6,15	23,2	2,78	1,31	0,40	0,91	2,05	0,26	1,05	1,95
25 м	6,22	18,93	1,97	0,64	0,33	0,49	0,82	0,22	0,45	1,82
26 м	6,05	23,5	2,14	0,94	0,43	0,91	0,96	0,35	0,67	1,43

В растворенной форме в изученном инъекционном льду среди катионов доминирует Na^+ (от 1,5 до 4 мг/л - табл. 2), на втором месте K^+ (от 0,5 до 2,1 мг/л).

Среди анионов преобладает Cl^- (от 0,6 до 3,3 мг/л - табл. 2), на втором месте SO_4^{2-} (от 0,3 до 1 мг/л).

Отношение $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ варьирует от 0,7 до 3,7, составляя в среднем 1,7.

Таблица 2. Максимальные, средние и минимальные значения гидрохимического состава ледяного ядра пинго - булгуньяха на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха

Параметры	рН	мкСм/см	Катионы и анионы, мг/л							$\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$
			Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	
максимум	6,57	47,1	4,12	2,1	0,43	1	3,34	0,35	1,05	3,67
среднее	6,20	26,0	2,34	1,10	0,30	0,73	1,22	0,22	0,72	1,72
минимум	5,96	15,74	1,51	0,48	0,18	0,49	0,6	0,11	0,26	0,74

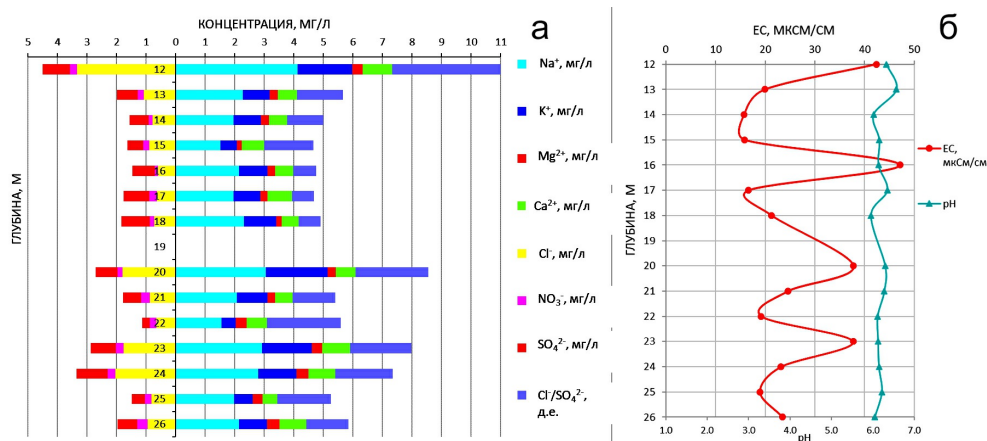


Рис. 6. Гидрохимический ледяного ядра пинго - булгуньяха (с глубины от 12 до 27 м) на месторождении Песцовое, в долине реки Евояха: а – вариации основных ионов и отношения $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$; б – вариации ЕС и рН

Дискуссия

Булгуньях – выпуклая мезоформа рельефа высотой до 8–10 м и диаметром в десятки, реже в сотни метров, окруженная с нескольких или со всех сторон понижениями и сложенная, как правило, грунтами супесчано-суглинистого состава с прослоями песков, возникающая при восходящем развитии многолетнемерзлых пород в результате внедрения влаги (или суспензии) при промерзании замкнутых таликов и образования

преимущественно инъекционного сильнольдонасыщенного ядра.

В строении бугров Орлиной и Самбургской структур и других районов юга Тазовского полуострова принимают участие сильнольдистые палеогеновые кремнисто-глинистые породы. В некоторых разрезах обнаружены остатки ледяных ядер в форме штоков. Лед бугров образован водами сульфатно-натриевого состава. В пробах воды, взятых из сопки Парны-Седэ (в пределах Самбургской структуры) Ю.Ф. Андреевым ^[21] были обнаружены микрокомпоненты йода и брома. Сравнение химического состава проб воды источников и льда из бугров с составом вод, заключенных в палеогеновых отложениях, подтверждает их сходство. Бугры этого типа в большинстве описанных случаев в настоящее время подвергаются разрушению. Однако в северных районах Гыданского полуострова и Ямала, например у пос. Лескина (северный Гыдан), описаны бугры пучения, которые возможно относятся к булгунням, и образование их, судя по формам бугров и их слабой степени разрушения, произошло сравнительно недавно.

Эти формы рельефа описаны во многих районах криолитозоны России в конце XX века ^[22,23,24,2,26,27,28,29,30] и в первое десятилетие XXI в ^[14,31]. Заметно вырос интерес к изучению булгунняхов во второе десятилетие XXI в ^[15-19, 32,33,34,35,36,37,39,40,41] и, особенно в недавнее время ^[42,43,44,45,46,47,48,49,50].

В булгуннях П.А.Соловьёвым ^[13] различаются следующие морфологические элементы.

1. Пьедестал - слабо приподнятая (0,5-1,0 м) полоса изменчивой ширины с небольшими уклонами, поднимающаяся к булгунняху и плавно сливающаяся с дном аласа (или хасырея). Изредка пьедестал ограничен невысокой выраженной ступенькой, которая, однако, не выдерживается по всему периметру. Ширина пьедестала, ограниченная собственно булгунняхом и дном аласа, колеблется от 1 до 60-80 м. Обычно пьедестал повторяет форму основания булгунняха. В таких случаях он имеет небольшую ширину и часто замаскирован делювиальным шлейфом. Иногда пьедестал бывает немного обширней булгунняха и имеет иную, обычно более вытянутую форму. В таких случаях булгуннях оказывается насаженным несимметрично, сдвинут на край пьедестала, а сам пьедестал имеет почти плоскую поверхность, ограниченную более крутыми по сравнению с ней склонами.

2. Склоны булгунняха, более или менее резко отличающиеся по крутизне от пьедестала.

3. Вершина булгунняха, выделяющаяся резким уменьшением общего уклона, по сравнению со склонами, часто представляется почти плоской, слабо выпуклой. Нередко расчленена на отдельные вершинки, а иногда как бы продавлена котловинкой.

4. Форма основания булгунняхов (вместе с пьедесталом) колеблется от почти правильного круга до сильно вытянутой каплеобразной фигуры, но преобладают эллиптические формы. Наиболее крутосклонная часть - собственно булгуннях, - имеет более правильную овальную форму основания, чем пьедестал. Невысокие плоские булгунняхи обычно имеют также правильную овальную форму. Длинную ось этого овала мы называем продольной осью продольной осью связано направление примерно параллельно ей наиболее крутого склона булгунняха, ориентированного параллельно борту аласа и почти прямолинейного в плане. Наиболее крупные и хорошо развитые трещины на вершине булгунняхов (осевые трещины) ориентированы также параллельно продольной оси. На продолжениях продольной оси часто располагаются сопряженные с булгунняхом западинки.

Наиболее обычная форма основания булгунняха вместе с пьедесталом близка к деформированному эллипсу, у которого поперечная полуось, идущая в сторону пологого склона, сильно вытянута, так что поперечная ось по общей длине равна или даже больше продольной.

Многочисленные булгунняхи встречены на высокой пойме в устьевой части долины Сабъяхи на севере Западной Сибири. Здесь они достигают высоты 8–9 м, в основании имеют форму эллипса, малая ось которого составляет 50–60, а большая – 80–100 м. Поверхность бугра обычно разбита морозобойными трещинами, в которых располагаются узкие ледяные жилы. Один из изученных бугров сверху сложен суглинком мощностью 0,3 м. Ниже (0,3–1,8 м) залегает темно-серая супесь, местами оторфованная, мерзлая. Криогенная текстура ее горизонтально–среднеслоистая, тонкошлировая. Толщина шлиров достигает 0,1–0,5 мм, общая льдистость более 50%. Ниже в разрезе прослежен суглинок легкий, темно–серый, плотный. Криогенная текстура горизонтально–среднеслоистая, тонкошлировая. С глубины 3,5 м криотекстура его неполносетчатая и вертикальнослоистая, тонкошлировая. Льдистость суглинка вниз по разрезу постепенно увеличивается, составляя на глубине 2 м 15%, на глубине 4 м 40%, на глубине 5 м около 50–60%. В интервале 5,0–5,5 м она увеличивается до 70–80% (возрастает вниз по разрезу и толщина шлиров). В интервале 5,5–6,9 м вскрыт лед, в верхней части с примесью грунта, ниже чистый. С глубины 6,9 до 9,7 м прослежен суглинок средний. Криотекстура его горизонтальнослоистая, толщина шлиров 0,5–2,0 мм. Среднегодовая температура грунта в осевой части бугра 6,6°С.

Булгунняхи встречаются также в местах осушения термокарстовых озер на террасах и междуречных равнинах. Они часто имеют несколько большие размеры, чем описанные выше булгунняхи осушенных старичных озер в пределах современных пойм рек. Большие их скопления закартированы и изучены сотрудниками МГУ [\[22,25,27\]](#), ВСЕГИНГЕО [\[20\]](#) и ПНИИСа [\[12\]](#) в бассейнах Надыма, Ямсовая, Евояхи, Табъяхи и Хадуттэ. Высота их в пределах Надым–Пуровского междуречья и Тазовского полуострова увеличивается от 4–5 м в районах со среднегодовой температурой –2°, –3°С до 10–12 м на севере полуострова. Диаметр основания бугров соответственно увеличивается от первых десятков до первых сотен метров. У многих крупных бугров наблюдается «пьедестал» по периферии бугров в виде террасовидной «ступеньки» высотой до 1–2 м.

В зависимости от конкретных геолого-геоморфологических условий строение булгунняхов неоднородно. Но все же в их разрезе преобладают, отложения супесчано-суглинистого состава с прослоями песков. Породы, слагающие ядро бугра, сильнольдонасыщенные, иногда в ядрах бугров фиксируются линзы и мощные прослои чистого льда. Превышение бугров над понижениями осуществляется за счет разницы содержания льда в разрезах бугров и разрезах понижений, причем высота бугра, как правило, тем больше, чем больше эта разность. Тем не менее полного совпадения высоты бугров с указанной разностью не отмечено, что может быть объяснено глубоким (глубже 12 м) залеганием льдистого горизонта под бугром. Мощные линзы льда (первые метры) характерны для крупных бугров, формирующихся при промерзании обширных таликов с большими запасами грунтовых вод (полное промерзание таких таликов осуществляется за десятки и даже сотни лет).

Интересно, что сейчас происходит не только формирование новых бугров инъекционного и инъекционно-сегрегационного генезиса, но и продолжается рост бугров, сформировавшихся в более ранние этапы голоцена.

Принципиальная возможность прироста ранее образовавшихся бугров в результате

последующих инъекций убедительно показана в работе Н.П. Анисимовой [23]. Она, на основании исследования химического состава очень крупного бугра пучения в районе пос. Мессояха (рис. 7), сделала ряд важных выводов: инъекция воды при образовании ядра бугра пучения была неоднократной; химический состав в промерзающем подозерном талике при этом изменился от гидрокарбонатно-магниево-кальциевого (на ранней стадии пучения) до гидрокарбонатного натриевого (на более поздних стадиях); верхние слои льда (глубина 2–5 м) образовались при сравнительно быстрой и полной кристаллизации воды, а глубже залегающие – при более медленной. На это указывает незначительное содержание в последних ионов кальция и магния, которые при медленной кристаллизации выпадают из раствора в осадок [23].

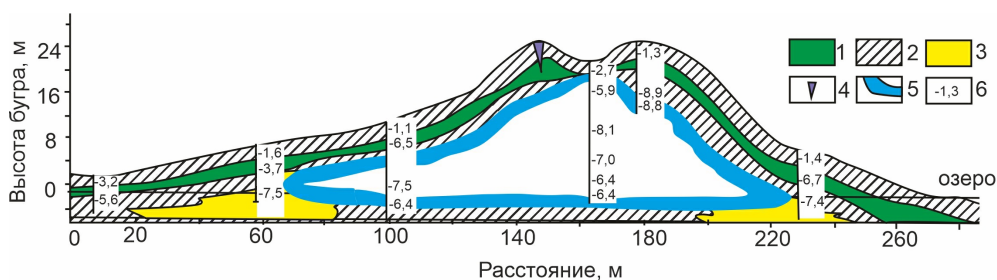


Рис. 7. Геокриологический разрез булгунняха (бугра пучения повторно-инъекционного типа) в 6 км к юго-востоку от пос. Мессояха на междуречье верховьев рек Юпаяхи и Верхняя Пендома на дне "хасырея" длиной 1,8 км шириной 1 км. По данным Н. И. Анисимовой и Е. Г. Карпова [23]: 1 – торф; 2 – суглинок; 3 – песок; 4 – повторно-жильный лед; 5 – повторно-инъекционный лёд (ядро булгунняха); 6 – температурные замеры по скважинам

В южной части зоны практически сплошного распространения мерзлых толщ и в пределах севера зоны совместного широкого распространения многолетне- и сезонномерзлых пород образование инъекционных бугров в основном произошло после климатического оптимума голоцена. В ряде районов отмечены новообразования инъекционных бугров, растущих в настоящее время.

В центральной и северной Якутии булгунняхи чаще располагаются на днищах аласов, на днищах аласных долин, и послеаласных котловинах. Подсчет количества булгунняхов, выполненный П.А.Соловьёвым [13] в окрестностях оз. Абалах на площади около 100 км² показал, что 20-30% всех осмотренных аласов имеют в себе 1-2 и иногда даже 5 булгунняхов.

Булгунняхи располагаются в котловинах с затрудненным стоком, преимущественно в таких, большая часть которых представляет собой высохшие озера. Принципиальной разницы между булгунняхами в аласах и на речных террасах в этом отношении нет. Расположение булгунняха в аласе согласно наблюдениям П.А.Соловьёва подчинено некоторым закономерностям. Средняя часть днища сухих аласов обычно несколько приподнята (повышение примерно 1-2 м), а пониженные участки серповидно изогнуты и прижаты к бортам аласов. Булгуннях обычно располагается на границе между повышенной частью и понижениями, выдвигаясь в низину, которая отделяет его от борта аласа. Поэтому булгуннях обычно располагается эксцентрично, очень близко к одному из бортов аласа. В некоторых случаях наблюдается кажущееся исключение из этого правила - булгуннях располагается в середине сложного аласа. Это объясняется тем, что булгуннях образовался ранее слияния соседних аласов, около разделявшей их межаласной перемычки, которая впоследствии разрушилась. Булгуннях поднимается со

дна наиболее пониженной части аласа, но обычно соединяется со срединным повышением, образуя как бы полуостров. Соединение это бывает различно. В отдельных случаях наблюдается, что булгуннях только немного более, чем на половину своего периметра выдвинут в низину и как бы насажен на повышенный участок. Иногда же он почти окружен низиной, и соединение имеет вид узкого и низкого перешейка. Часто булгунняхы поднимаются со дна небольшого озера или, болотца.

Размеры булгунняхов в центральной Якутии колеблются в широких пределах. В районе оз. Абалах высота их изменяется от 1,5 до 12 м, длина – от 40 до 140 м, ширина от 25 до 120 м (вместе с пьедесталом) и соответственно – длина 40-100 м, ширина 25-80 м без пьедестала). Наиболее часто встречались булгунняхы длиной 50-70 м и шириной 40-50 м (без пьедестала). Встречаются булгунняхы и нескольких больших размеров. На Лено-Амгинском междуречье высота их достигает до 20 м, в других районах до 40 и даже 60 м. ^[13] Подошва льдистого ядра булгунняхов лежит на глубине 4-8 м ниже уровня дна аласа или хасырея.

Булгунняхы высотой до 12 м встречены Г.С.Константиновой заболоченных понижениях второй надпойменной террасы р.Пясины. Крупные бугры пучения отмечены О.Боярским также на Анабаро-Оленёкской низменности. Большое количество булгунняхов высотой до 30 м встречено в дельте р.Лены. Часто в разрезе булгунняхов имеется ледяное ядро мощностью до 10 м и более.

В.В.Бутвиловский ^[29] исследовал возраст отложений в пределах поля булгунняхов в центральном Алтае (в межгорной котловине севернее Северо-Чуйского хребта). Торф на глубине 0,2 м был датирован в 1880 ± 60 лет, а гиттия в интервале глубин 0,7-2,7 м датирована 5 датами от 2100 ± 100 до 3780 ± 35 лет, растительные остатки в пылеватой глине в ядре булгунняхы датированы от 4 до 15 тыс. лет. Можно предполагать, что возраст булгунняхов этого массива не более 2000 лет.

Т.А.Бляхарчук с соавторами ^[31] также провела исследование возраста булгунняхов на Алтае близ оз.Джангысгол. Здесь были исследованы небольшие булгунняхы высотой 3-6 м, сложенные мёрзлыми озерными отложениями с многочисленными растительными остатками. Водоемы округлой формы в пределах массива с булгунняхами фиксируют термокарстовые понижения. С востока оз.Джангысгол окружает болото с многолетнемерзлыми отложениями, в котором прослеживаются кольцевые структуры, по форме напоминающие термокарстовые водоемы в пределах массива с булгунняхами. Подобные структуры слабо прослеживаются и под водой на дне озера.

Стратиграфические, палинологические и радиоуглеродные исследования по мнению Т.А.Бляхарчук указывают на то, что озеро осушилось в начале голоцена (около 9 тыс. лет назад) вследствие того, что р.Куркурек, ^[31] берущая начало в горах и питающая озеро, сменила русло к западу от этого аллювиального болота. Началось многолетнее промерзание отложений, сопровождающееся ростом булгунняхов. Вода замерзала и происходило вспучивание с образованием небольших булгунняхов. Повторные инъекции воды могли приводить к образованию групп бугров с ледяным ядром.

Формирование булгунняхов и многолетнемерзлых пород в болоте к югу от современного озера могло способствовать повторному наполнению озера, но уже не горными водотоками, а локальными атмосферными осадками. В позднем голоцене произошло расширение площади озера в южном направлении, и увеличение площади болота к югу и востоку от озера, где начали формироваться современные пинго.

¹⁴C датирование растительных остатков булгунняха Джангыскол показало, что орешки осок в верхней части разреза (на глубине 1,2 м) датированы 890 ± 30 лет (CURL 4836), веточки в гиттии на глубине 1,9 м – 330 ± 29 лет (Utc-8467), ниже в гиттии орешки осок на глубине 2,3 м датированы 2310 ± 30 лет (CURL 4837), а остатки риччии 7672 ± 46 лет (Utc-8355). Таким образом, булгуннях Джангыскол, скорее всего, начал формироваться несколько сотен лет назад.

Как булгуннях, описанные В.В.Бутвиловским^[29], так и булгуннях на оз.Джангыскол формировались как в позднем голоцене, так и сравнительно недавно. Это свидетельствует о стабильности условий формирования булгунняхов на Алтае и в голоцене, и в настоящее время.

Приведенные данные демонстрируют, что:

- 1). Булгуннях формируются в разное время в зависимости от изменений локальных геоморфологических условий, а также региональных климатических трендов. Возраст булгунняхов сильно варьирует, что согласуется с механизмом их формирования, поскольку естественно, что дренаж озера не привязан к какому-то палеогеографическому событию и может происходить произвольно в разное время даже в пределах одного района.
- 2). Пучение нередко происходит в два этапа: вначале по периферии бугра, а затем в центральной части около 2500 лет назад.
- 3). Скорость образования булгунняхов бывает очень высока и за несколько десятков или сотен лет они достигают высоты 15-20 м и более.^[30]

Самсонов с соавторами^[37] исследовали рост большого, относительно молодого пинго в береговой зоне. Тактоякак, используя спутниковый дифференциальный интерферометрический радиолокатор и высокоразрешающие изображения RADARSAT-2 (2011–2014 гг.), и выявили рост со скоростью 2,7 см в год куполообразного поднятия пинго, расположенного в осушенном бассейне озера. Этот пинго является одним из самых бугров в регионе, который в настоящее время растет. Анализ исторических аэрофотоснимков показал, что поднятие поверхности грунта в этом месте началось между 1935 и 1951 гг. после осушения остаточного озера. Поднятие в значительной степени обусловлено ростом инъекционного льда. Смоделированная аградация многолетнемерзлых пород с 1972 по 2014 гг. приблизительно соответствовала изменениям высоты бугра, оцененным по аэрофотоснимкам за этот период времени.^[37]

Гидрохимия льдов пинго (булгунняхов). Гидрохимический ледяного ядра во многом должен булгунняхов отражать состав водоема (озера, болота), который стал основным источником льда при промерзании, льдообразовании и пучении бугра.

Детальный изотопно-кислородный и дейтериевый анализ ледяного ядра пинго Песцовое^[15,16,17,19] позволил получить важные выводы об условиях формирования и источниках воды для ядра бугра. Начальные изотопные характеристики воды, из которой формировался лед ядра для пинго Песцовое близки к современным атмосферным осадкам региона, мы полагаем начальная вода имела значения $\delta^{18}\text{O} = -14\text{‰}$. Для пинго Песцовое отчетливо проявлена закрытая система, которая реализовывалась при промерзании сверху озерного замкнутого талика. Верхняя часть льда образовывалась при высоких скоростях, поэтому значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ льда этой части льда ядра пинго

сдвинуты относительно начальной воды незначительно и варьируют от $-11,6$ до -13‰ и от $-97,9$ до $-106,5\text{‰}$ соответственно. Затем скорости льдообразования упали и большая часть льда ядра образовалась в условиях Рэлеевского процесса, что обусловило выраженное понижение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ сверху вниз от -12 до $-15,8\text{‰}$ и от $-95,3$ до -120‰ , соответственно. Нижняя часть ледяного ядра возможно образовалась на подошве границы ММП при ее поднятии, т.е. при промерзании снизу-вверх. При формировании верхней части ледяного ядра пинго и дополнительного роста его высоты заметную роль может играть вакуумный механизм засасывания воды из окружающего озера (подозерного талика), возникающий за счет таяния верхней части льдистого ядра из-за высокого давления, существенно снижающего температуру таяния льда. Этот механизм не противоречит условиям открытой/полу-закрытой системы, установленной по изотопному составу льда, т.к. всасывание воды из относительно большого резервуара воды (озера или обводненного талика) в вакуумную полость и последующее ее замерзание не приводило к выраженной динамике изотопных значений по Рэлеевскому типу. [\[19\]](#)

Этой трехчленной модели формирования ядра в определенной мере соответствует и распределение основных ионов в гидрохимическом составе ледяного булгуньяха Песцовое (см. табл. 1, см. рис. 6) например максимумы ионов Na^+ ($4,12$ мг/л), K^+ ($1,85$ мг/л) и Cl^- ($3,34$ мг/л), наряду с максимумом соотношения $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ ($3,67$) в самой верхней части ледяного ядра - на глубине 12 м, формировавшейся в начальный этап образования ядра при высоких скоростях льдообразования, ниже располагается толща мощностью $7-9$ м, которая соответствует этап образования ледяного ядра при небольших скоростях льдообразования, когда ионный состав был более однородный, а еще ниже - толща ледяного ядра мощностью $5-7$ м, скорее всего, образовавшаяся близ подошвы ММП при ее промерзании снизу-вверх. Здесь опять за счет криогенного концентрирования ионов отмечены локальные максимумы ионов Na^+ (до $3,0$ мг/л), K^+ (до $2,1$ мг/л) и Cl^- (до $2,1$ мг/л), наряду с заметным соотношением $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ (от $1,4$ до $2,5$).

Одни из первых данных, полученные для Западно-Сибирского булгуньяха получены Н.П. Анисимовой и Е.Н. Карповым [\[23,51\]](#). Исследованный и опробованный Е. Г. Карповым в 1974 г. гигантский булгуньях (см. рис. 7) находится в 6 км к юго-востоку от пос. Мессояха на междуречье верховьев рек Юпаяха и Верхняя Пендомаяха, на дне осушенной озерной котловины, в 150 м от ее северо-западного борта. Длина котловины $1,8$ км, ширина 1 км, глубина $4-5$ м.. В разных частях дна котловины находятся небольшие остаточные озера с максимальной измеренной глубиной до $1,2$ м, размерами 250×150 м. Озера соединяются между собой заболоченными понижениями, летом почти пересыхающими. На прочих участках дно плоской котловины представляет собой сфагновое болото и мохово-кустарниковую тундру с трещинно-полигональным рельефом. На возвышенных, более дренированных участках краевой части дна котловины мощные реликтовые торфяники содержат повторно-жильные льды. [\[23\]](#) Булгуньях имеет продолговатую округло-овальную форму с двумя выступами - пьедесталами. Высота булгуньяха $22,5$ м, длина 285 , ширина 175 м. Его вершина разделена на две части продолговатым седловидным понижением, являющимся, по-видимому, осевой трещиной разрыва отложений, образовавшейся в период поднятия бугра. Длина понижения 50 м, ширина 20 , глубина 3 м. Вершина булгуньяха раздроблена морозобойными трещинами на отдельные блоки (полигоны) со сторонами $5-6$ м. Мощное ядро чистого инъекционного льда в разных частях булгуньяха залегает на разной глубине от поверхности под слоем сильнооторфованного суглинка, льдо-насыщенного торфа и ледогрунтового горизонта. В

седловине булгуннях инъекционный лед начинается с глубины 1,1 м от поверхности, сразу под оторфованным суглинком, на других участках он залегает значительно глубже. Максимальная мощность льда под вершиной булгуннях, по-видимому, превышает 21 м. На склонах инъекционный лед выклинивается вблизи основания бугра.^[51]

Наиболее низкая температура пород характерна для центральной части булгуннях, где на глубине 7 м от поверхности в июне она равнялась $-9,7^{\circ}\text{C}$, а в конце августа $-8,4^{\circ}\text{C}$. Пробы льда для химического анализа были отобраны Е. Г. Карповым по вертикальному разрезу линзы в процессе проходки скважины на его вершине, в седловине и на пьедестале.

Отмечены^[51] значительные колебания величины общей минерализации льда по вертикальному разрезу инъекционного льда (рис. 8), которые обусловлены главным образом изменениям и концентрации ионов гидрокарбоната и натрия и в меньшей степени – ионов магния и кальция. Содержание хлор-иона изменяется мало. Наибольшие значения минерализации льда отмечаются на глубинах 5 и 20 м, менее значительные ее повышения – на глубинах 10 и 18 м.

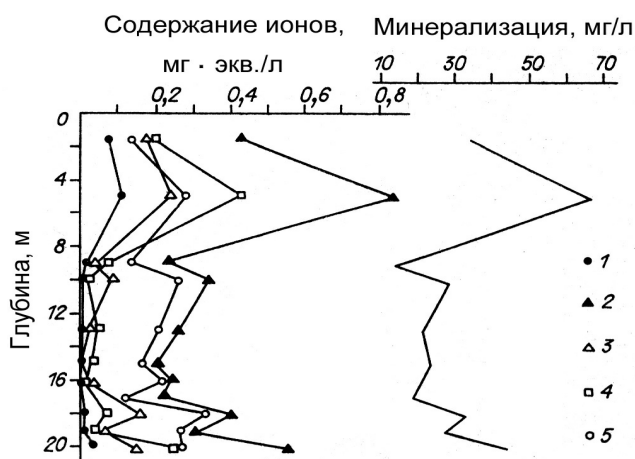


Рис. 8. Изменение содержания ионов и минерализации в вертикальном разрезе инъекционного льда булгуннях в районе пос. Мессояха. Из Н.П. Анисимовой^[51]

Изменение химического состава и величины общей минерализации льда булгуннях и сравнение их с особенностями распределения компонентов минерализации по разрезу линзы инъекционного льда в бугре пучения позволили Н.П. Анисимовой предположить, что: "1) инъекция воды при образовании булгуннях была неоднократной; 2) химический состав воды в промерзающем подозерном талике при этом изменился от гидрокарбонатного магниево-кальцевого (на ранней стадии пучения) до гидрокарбонатного натриевого (на более поздних стадиях); 3) верхние слои льда (глубина 2–5 м) образовались при сравнительно быстрой и полной кристаллизации воды, а глубже залегающие – при более медленной; 4) незначительное содержание во льду ионов кальция и магния (начиная с глубины 7–8 м) указывает на медленную кристаллизацию воды, при которой карбонаты из раствора выпадают в осадок; 5) повышенная засоленность льда на глубине 20 м и преобладание в нем гидрокарбонатов магния и натрия свидетельствуют о возросшей минерализации воды, из которой он образовался, за счет криогенного концентрирования в исходной воде этих компонентов."^[51, стр. 92]

Н.П. Анисимова заключила,^[51] что использование данных химического состава льда

для интерпретации условий и характера инъекционного льдообразования возможно только при частом отборе проб (не реже чем через каждые 0,5 м) по всему разрезу линзы. Одиночные же пробы льда, взятые с одной какой-либо глубины, не могут характеризовать ни химического состава исходной воды, ни условия льдообразования.

Автор с коллегами [\[40\]](#) изучили булгуннях (пинго) Мессояха-1, с ледяным ядром мощностью 6,5 м, который расположен на юге Гыданского п-ова в зоне сплошного с поверхности распространения мерзлых пород, среднегодовая температура воздуха по данным ближайшей метеостанции Тазовский составляет $-9,7^{\circ}\text{C}$. Булгуннях расположен на краю хасырея рядом с озером. Абс. высота вершины составляет 42,9 м. На вершине бугра заложена параметрическая скважина с отбором керна вскрывшая ледяное ядро в интервале глубин от 4,5 до 11,0 м. Лед чистый прозрачный.

Судя по гидрохимическому составу льда (табл. 3) и весьма однородному соотношению $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$, варьирующему в основном от 2 до 3, вода, из которой сформировался лед ядра булгуннях Мессояха-1, примерно одна и та же и относится к озерным хлоридно-кальциевым водам.

Таблица 3. Гидрохимический состав льда ядра булгуннях Мессояха-1. Из [\[40\]](#)

Глубина отбора, м	Na^+ , мг/л	K^+ , мг/л	Mg^{2+} , мг/л	Ca^{2+} , мг/л	Cl^- , мг/л	NO_3^- , мг/л	SO_4^{2-} , мг/л
7	1,12	0,72	0,17	3,41	1,11	<0,1	0,36
7,05	1,73	0,81	0,20	4,21	2,65	<0,1	0,90
7,1	1,98	1,52	0,36	4,88	2,67	<0,1	0,85
7,15	1,42	1,98	0,30	4,14	1,74	<0,1	0,54
7,2	1,05	0,65	0,12	4,03	1,49	<0,1	0,45
8,3-8,4	1,82	1,55	0,49	5,29	2,74	0,10	1,10
8,4-8,5	1,29	1,24	0,13	5,68	1,51	<0,1	0,53
8,5-8,6	0,72	0,54	0,18	5,41	1,14	0,10	0,41
9,2-9,3	0,87	0,61	0,19	5,40	1,26	0,10	0,40
9,4-9,5	0,78	0,48	0,10	4,71	0,94	0,10	0,41
9,5-9,6	1,05	0,62	0,14	5,40	1,39	0,17	0,52
10	0,75	0,47	0,15	5,20	0,93	0,13	0,34
10,3-10,4	0,47	0,26	0,10	3,40	0,57	0,18	0,27
10,5	0,80	0,38	0,18	4,15	1,12	0,17	0,53
10,6-10,7	0,42	0,47	0,12	4,88	0,98	<0,1	0,44

Гидрохимический состав ледяного ядра пинго, высота, которого 9,5 м полностью вскрытого скв. 9 в Грёндалене, западный Шпицберген, исследован Н.Демидовым и др. [\[41\]](#) Лед ядра пинго почти прозрачен и достигает мощности 20,7 м. Самая низкая измеренная температура грунта составила $2,5^{\circ}\text{C}$. Максимальная глубина протаивания 1,5 м в сентябре 2018 г. достигла самой верхней границы льда ядра, что, вероятно указывает на продолжающуюся быструю деградацию пинго. Это также видно по кратерному озеру на вершине пинго и сильной солифлюкции, которая удаляет покровные отложения вниз по склону. Изотопная запись льда ядра указывает на два эпизода замерзания замкнутой системы и два эпизода полузамкнутого замерзания, когда исходная вода, питающая ледяное ядро, пополнялась.

Гидрохимический состав ледяного ядра представлен в основном ионами натрия (от 5 до

217 мг/л, в среднем 38-52 мг/л), хлора (от 1 до 121 мг/л, в среднем 19-27 мг/л) и гидрокарбонатов (от 1 до 336 мг/л, в среднем 59-81 мг/л) и схож с составом родниковой воды в Грёндалене. [\[41\]](#)

Заключение

1. В растворенной форме в изученном инъекционном льду ядра булгунняха (пинго) Песцовое среди катионов доминируют ионы натрия (от 1,5 до 4 мг/л), на втором месте ионы калия (от 0,5 до 2,1 мг/л). Среди анионов преобладает хлор-ион (от 0,6 до 3,3 мг/л), на втором месте сульфат-ион (от 0,3 до 1 мг/л). Отношение хлор-ионов к сульфат-ионам варьирует от 0,7 до 3,7, составляя в среднем 1,7.

2. Распределение основных ионов в гидрохимическом составе ледяного булгунняха (пинго) Песцовое в определенной мере соответствует трехчленной модели формирования ядра: а) максимумы ионов Na^+ (4,12 мг/л), K^+ (1,85 мг/л) и Cl^- (3,34 мг/л), наряду с максимумом соотношения $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ (3,67) отмечены в самой верхней части ледяного ядра - на глубине 12 м, формировавшейся в начальный этап образования ядра при высоких скоростях льдообразования; б) ниже располагается толща мощностью 7-9 м, которая соответствует второму этапу образования ледяного ядра при небольших скоростях льдообразования, когда ионный состав был более однородный; в) еще ниже - располагается толща ледяного ядра мощностью 5-7 м, скорее всего, образовавшаяся близ подошвы ММП при ее промерзании снизу-вверх. Здесь опять отмечены локальные максимумы ионов Na^+ (до 3,0 мг/л), K^+ (до 2,1 мг/л) и Cl^- (до 2,1 мг/л), наряду с заметным соотношением $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ (от 1,4 до 2,5).

Благодарности

Автор выражает благодарность Л. В. Добрыдневой за выполнение хроматографического анализа ионного состава льдов, Н.А. Буданцевой за помощь при проведении полевых работ, Е.Е. Подборному за помощь в организации отбора льда и Л.Б.Блудушкиной за участие в оформлении работы.

Библиография

1. Alexeev S.V., Alexeeva L.P. Ground ice in the sedimentary rocks and kimberlites of Yakutia, Russia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2002. Vol. 13. Pp. 53-59. doi:10.1002/ppp.408. EDN: LHNHVB.
2. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Kononov A.M. Trace elements and rare earth elements in ground ice in kimberlites and sedimentary rocks of Western Yakutia // *Cold Regions Science and Technology*. 2016. Vol. 123. Pp. 140-148. doi:10.1016/J.COLDREGIONS.2015.10.008. EDN: WPNWVX.
3. Плащев А.В. Взрыв ледяного бугра // *Природа*. 1956. № 9. С. 113.
4. Богомолов Н.С., Складневская А.Н. О взрывах гидролакколитов в южной части Читинской области // *Наледи Сибири*. М.: Наука, 1969. С. 127-130.
5. Mackay J.R. Pingo growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula area, Western Arctic coast, Canada: a long-term field study // *Geographie Physique et Quaternaire*. 1998. Vol. 52. N 3. Pp. 271-323. doi:10.7202/004847ar.
6. Svensson H. Pingos yttre delen av Adventdalen // *Norsk Polaristitut Årbok*. 1969. 1970. P. 168-174.
7. Müller F. Analysis of some stratigraphic observations and radiocarbon dates from two pingos in the Mackenzie Delta area, N.W.T. // *Arctic*. 1962. Vol. 15. Pp. 279-288.

8. Mackay J.R. Growth of Ibyuk Pingo, Western Arctic Coast, Canada, and some implications for environmental reconstructions // *Quatern. Res.* 1986. Vol. 26. Iss. 1. Pp. 68-80.
9. Olson E.A., Broecker W.S. Lamont natural radiocarbon measurements V // *American Journal of Science.* 1959. Vol. 257. N 1. Pp. 1-11.
10. Толстихин Н.И. Подземные воды Забайкалья и их гидролакколиты // *Труды Комиссии по изучению вечной мерзлоты.* Т. 1. Л.: Изд-во АН СССР, 1932. С. 29-50.
11. Андреев В.Н. Гидролакколиты (булгунняхи) в Западно-Сибирских тундрах // *Известия Государственного географического общества.* 1936. Т. 68. Вып. 2. С. 40-47.
12. Минаев А.Н. Крупные гидролакколиты в Западно-Сибирской низменности // *Многолетнемёрзлые горные породы различных районов СССР.* М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 120-125.
13. Соловьёв П.А. Булгунняхи центральной Якутии // *Исследования вечной мерзлоты в Якутской республике.* Вып. 3. М.: Изд-во АН СССР, 1952. С. 226-258.
14. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А. Радиоуглеродное определение возраста булгунняха на месторождении Песцовое в северной части Западной Сибири // *Инженерная геология.* 2010. № 2. С. 16-23.
15. Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Yoshikawa K., Podborny Ye.Ye., Chizhova Ju.N. Isotope composition of pingo ice core in the Yevo-Yakha River valley, north-west Siberia // *Earth's Cryosphere (Kriosfera Zemli).* 2014. Vol. 18. N 4. Pp. 41-51.
16. Vasil'chuk Yu.K., Lawson D.E., Yoshikawa K., Budantseva N.A., Chizhova Ju.N., Podborny Ye.Ye., Vasil'chuk A.C. Stable Isotopes in the closed-system Weather Pingo, Alaska and Pestsovoye Pingo, northwestern Siberia // *Cold Regions Science and Technology.* 2016. Vol. 128. Pp. 13-21. doi:10.1016/j.coldregions.2016.05.001. EDN: WWHCBP.
17. Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Rogov V.V., Podborny Ye., Chizhova Ju.N. New Data on Variations of Stable Isotopes in the Pingo Ice Core in the Southern Part of the Tazovsky Peninsula // *Doklady Earth Sciences.* 2017. Vol. 472, Part 2. Pp. 200-204. DOI: 10.1134/S1028334X17020064 EDN: DUYIIF.
18. Чижова Ю.Н., Васильчук Ю.К. Изотопная индикация условий образования ледяного ядра булгунняхов (пинго) // *Лёд и снег.* 2018. Т. 58. № 4. С. 507-523. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-4-507-523 EDN: VQLHON.
19. Vasil'chuk Yu.K., Chizhova Ju.N., Budantseva N.A., Kurchatova A.N., Rogov V.V., Vasil'chuk A.C. Stable oxygen and hydrogen isotope compositions of the Messoyakha and Pestsovoye pingos as markers of ice core formation // *Permafrost and Periglacial Processes.* 2021. Vol. 32. N 4. Pp. 558-572.
20. Геокриологические условия Западно-Сибирской газоносной провинции / Тагунова Л.Н., Мельников Е.С., Горальчук М.И., Крицук Л.Н. и др.; Отв. ред. Е.С. Мельников. Новосибирск: Наука, 1983. 193 с.
21. Андреев Ю.Ф. О связи линейно-грядового рельефа с тектоническими структурами на севере Западной Сибири (в области развития многолетней мерзлоты) // *Геология и геохимия.* 1960. Вып. 3 (IX). С. 76-94.
22. Трофимов В.Т., Бадю Ю.Б., Кудряшов В.Г., Фирсов Н.Г. Полуостров Ямал (инженерно-геологический очерк) / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. 245 с.
23. Анисимова Н.П., Карпов Е.Г. Химический состав инъекционного льда // *Геокриологические и гидрогеологические исследования Якутии.* Якутск, 1978. С. 125-137. EDN: VXZQMR.
24. Walker D.A., Walker M.D., Everett K.R., Weber P.J. Pingos of the Prudhoe Bay region, Alaska // *Arctic and Alpine Research.* 1985. Vol. 17. Pp. 321-336.
25. Трофимов В.Т., Бадю Ю.Б., Васильчук Ю.К., Фирсов Н.Г. и др. Экзогеодинамика Западно-Сибирской плиты (пространственно-временные закономерности) / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 246 с. EDN: UTIFMZ.

26. Mackay J.R. Pingo collapse and paleoclimatic reconstruction // *Canadian Journal of Earth Sciences*. 1988. N 25(4). Pp. 495-511.
27. Трофимов В.Т., Васильчук Ю.К., Баулин В.В. и др. Геокриология СССР. Западная Сибирь. М.: Недра, 1989. 454 с.
28. Mackay J.R. Seasonal growth bands in pingo ice // *Canadian Journal of Earth Sciences*. 1990. Vol. 27. N 8. Pp. 1115-1125.
29. Бутвиловский В.В. Палеогеография последнего оледенения и голоцена Алтая: событийно-катастрофическая модель. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1993. 252 с.
30. Mackay J.R. Pingo growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula area, Western Arctic coast, Canada: a long-term field study // *Geographie Physique et Quaternaire*. 1998. Vol. 52. N 3. Pp. 271-323.
31. Blyakharchuk T.A., Wright H.E., Borodavko P.S., van der Knaap W.O., Ammann B. The role of pingos in the development of the Dzhangyskol lake-pingo complex, central Altai Mountains, southern Siberia // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2008. Vol. 257. Iss. 4. Pp. 404-420. DOI: 10.1016/j.palaeo.2007.09.015. EDN: LLBOGL.
32. Grosse G., Jones B.M. Spatial distribution of pingos in northern Asia // *The Cryosphere*. 2011. Vol. 5. Pp. 13-33. DOI: 10.5194/tc-5-13-2011. EDN: RKEZCB.
33. Mackay J.R., Burn C.R. A century (1910-2008) of change in a collapsing pingo, Parry Peninsula, Arctic coast, Canada // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2011. Vol. 22. Pp. 262-272.
34. Jones B.M., Grosse G., Hinkel K.M., Arp C.D., Walker S., Beck R.A., Galloway J.P. Assessment of pingo distribution and morphometry using an IfSAR derived digital surface model, western Arctic Coastal Plain, Northern Alaska // *Geomorphology*. 2012. Vol. 138. Iss. 1. Pp. 1-14.
35. Yoshikawa K., Lawson D., Sharkhuu N. Stable Isotope Composition of Ice Core in Open- and Closed-System Pingos // *Permafrost, Tenth International Conference, Proceedings / Ed.: K.M. Hinkel. Salekhard, 25-29 June 2012*. Vol. 1. Salekhard: The Northern Publisher, Russia, 2012. Pp. 473-478.
36. Yoshikawa K., Sharkhuu N., Sharkhuu A. Ground water hydrology and stable isotope analysis of an open-system pingo in Northwestern Mongolia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2013. Vol. 24. N 3. Pp. 175-183.
37. Samsonov S.V., Lantz T.C., Kokelj S.V., Zhang Y. Growth of a young pingo in the Canadian Arctic observed by RADARSAT-2 interferometric satellite radar // *The Cryosphere*. 2016. Vol. 10. Pp. 799-810. doi:10.5194/tc-10-799-2016.
38. Ishikawa M., Yamkhin J. Formation Chronology of Arsain Pingo, Darhad Basin, Northern Mongolia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2016. Vol. 27(3). Pp. 297-306. doi:10.1002/ppp.1877. EDN: XTRQEF.
39. Wetterich S., Schirrmeister L., Nazarova L., Palagushkina O., Bobrov A., Pogosyan L., Savelieva L., Syrykh L., Matthes H., Fritz M., Gunther F., Opel T., Meyer H. Holocene thermokarst and pingo development in the Kolyma Lowland (NE Siberia) // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2018. Vol. 29(3). Pp. 182-198. doi:10.1002/ppp.1979. EDN: YBXYTR.
40. Vasil'chuk Yu.K., Kurchatova A.N., Budantseva N.A., Rogov V.V., Chizhova Ju.N. Variations of Stable Oxygen and Hydrogen Isotopes in the Ice Core of the Pingo (Southern Part of Gydan Peninsula) // *Doklady Earth Sciences*. 2019. Vol. 488(1). Pp. 1137-1141. doi:10.1134/S1028334X19090319. EDN: HNBYJL.
41. Demidov N., Wetterich S., Verkulich S., Ekaykin A., Meyer H., Anisimov M., Schirrmeister L., Demidov V., Hodson A.J. Geochemical signatures of pingo ice and its origin in Grøndalen, west Spitsbergen // *The Cryosphere*. 2019. Vol. 13. Pp. 3155-3169. doi:10.5194/tc-13-3155-2019. EDN: YQYJMU.
42. Demidov V., Wetterich S., Demidov N., Schirrmeister L., Verkulich S., Koshurnikov A.,

- Gagarin V., Ekaykin A., Terechov A., Veres A., Kozachek A. Pingo drilling reveals sodium-chloride dominated massive ice in Grøndalen, Spitsbergen // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2021. Vol. 32. Pp. 572-586. doi:10.1002/ppp.2124. EDN: FTIDYM.
43. Demidov V.E., Demidov N.E., Verkulich S.R., Wetterich S. Distribution of pingos on Svalbard // *Geomorphology*. 2022. Vol. 412. 108326. doi:10.1016/j.geomorph.2022.108326. EDN: MIYSDX.
44. Демидов Н.Э., Гунар А.Ю., Балихин Е.И., Гагарин В.Е., Гузева А.В., Дежникова А.А., Казанцев В.С., Кошурников А.В., Нарижная А.И. Строение, газосодержание и термическое состояние многолетних бугров пучения (булгунняхов) в долине р. Васьюган (окрестности г. Салехард, Западная Сибирь) // *Геофизические процессы и биосфера*. 2022. Т. 21, № 3. С. 27-38. DOI: 10.21455/GPB2022.3-4 EDN: LARSFO.
45. Wolfe S.A., Morse P.D., Parker R., Marcus R., Phillips M.R. Distribution and morphometry of pingos, western Canadian Arctic, Northwest Territories, Canada // *Geomorphology*. 2023. Vol. 431. 108694. doi:10.1016/j.geomorph.2023.108694. EDN: MGEOMX.
46. Гутарева О.С., Иванов Е.В., Буддо И.В., Кононов А.М., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Шейн А.Н., Краев Г.Н., Смирнов А.С. Происхождение льдов бугров пучения в районе реки Еркута-яха (п-ов Ямал) по результатам исследования изотопных соотношений δD и $\delta^{18}O$ // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2024. 15 (6). 0800. doi:10.5800/GT-2024-15-6-0800. EDN: NVREKB.
47. Шарин В.В. Пинго (гидролаколиты) в долине Вудфиорддален (остров Западный Шпицберген): морфологические особенности, возраст, условия формирования // *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*, выпуск 11. 2024. С. 412-424. doi:10.24412/2687-1092-2024-11-412-424. EDN: IWFVFX.
48. Paull C.K., Hong J.K., Caress D.W., Gwiazda R., Kim J.-H., Lundsten E., Paduan J.B., Jin J.K., Duchene M.J., Rhee T.S., Brake V., Obelcz J., Walton M.A.L. Massive ice outcrops and thermokarst along the Arctic shelf edge: By products of ongoing groundwater freezing and thawing in the subsurface // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2024. Vol. 129, e2024JF007719. doi:10.1029/2024JF007719. EDN: EUXURP.
49. Демидов В.А. Гидролаколиты архипелага Шпицберген / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. М., 2024. 27 с.
50. Liu G., Xiao Y., Hu G., Wu T., Wu X., Wang L., Xie C., Zou D., Du E., Zhao Y., Lu Y., Zhao L. The surface features and internal structure of an integrated open system pingo in the source area of the Yangtze River on the Qinghai-Tibet Plateau // *Catena*. 2025. Vol. 255. 109070. doi:10.1016/j.catena.2025.109070.
51. Анисимова Н.П. Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981. 153 с. EDN: RVILON.

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Предметом исследования является изучение концентрации основных растворимых ионов в ядре булгунняха на месторождении Песцовое долины реки Евояха на юге Тазовского полуострова.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения концентраций основных растворимых ионов в ядре булгунняха - многолетнего бугра пучения, с целью более точного изучения источника образования льда. В зоне практически сплошного распространения многолетнемерзлых пород и на севере более южной мерзлотной зоны широко распространены инъекционные бугры пучения, которые подразделяются на

гидролакколиты и булгунняхы. Булгунняхы чаще всего располагаются в районах новейших тектонических поднятий, в различных частях зоны сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Подземные льды в кимберлитовых трубках западной Якутии имеют разный ионный состав благодаря тому, что вмещающие их породы содержат существенно различающееся количество анионов и катионов. Цель данной работы изучить состав основных растворимых ионов в ядре пинго (булгунняхы) на месторождении Песцовое в долине реки Евояха на юге Тазовского полуострова.

Методология исследования основана на методах бурения скважины глубиной до 30 м, для изучения внутреннего строения ледяного ядра с целью отбора образцов для дальнейших изотопно-гидрохимических определений. Измерения макрокомпонентного состава льда проводились с помощью ионного хроматографа «Стайер» (Россия). Для изучения состава льда из ядра булгунняхы использована методика выполнения измерений массовой концентрации катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , NH_4^{+} в пробах питьевой, минеральной, природной и сточной воды методом ионной хроматографии ФР.1.31.2005.01738. Радиоуглеродное датирование торфа, выполнено в Геологическом институте РАН с помощью Л.Д.Сулержицкого.

Научная новизна заключается в том, что авторы впервые провели изучение концентраций основных растворимых ионов в ядре булгунняхы на месторождении Песцовое долины реки Евояха на юге Тазовского полуострова. Такие исследования ранее не выполнялись. Установлено, что гидрохимический состав ледяного ядра представлен в основном ионами натрия (от 5 до 217 мг/л, в среднем 38-52 мг/л), хлора (от 1 до 121 мг/л, в среднем 19-27 мг/л) и гидрокарбонатов (от 1 до 336 мг/л, в среднем 59-81 мг/л) и схож с составом родниковой воды в Грёндалене.

Стиль статьи - научный, соответствует установленным требованиям журнала. Структура статьи включает в себя введение, результаты и обсуждение, заключение, библиографию. Содержание научной статьи полностью раскрывает ее тему, выводы доказательны и обоснованы. Текст написан научным языком, статья соответствует объёму согласно требованиям журнала. Статья очень информативная, содержит много экспериментального материала, фотографий объектов изучения, графиков, таблиц, что улучшает восприятие материала.

Библиография статьи слишком обширна и включает в себя 51 литературный источник. Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на использованные литературные источники и выражении авторского мнения по изучаемой проблеме.

Выводы в статье передают основную мысль автора по проведенным результатам исследований. В результате проведенных исследований, автор приходит к выводу, что в растворенной форме в изученном инъекционном льду ядра булгунняхы (пинго) Песцовое среди катионов доминируют ионы натрия (от 1,5 до 4 мг/л) и ионы калия (от 0,5 до 2,1 мг/л). Среди анионов преобладает хлор-ион (от 0,6 до 3,3 мг/л), на втором месте сульфат-ион (от 0,3 до 1 мг/л). Отношение хлор-ионов к сульфат-ионам варьирует от 0,7 до 3,7, составляя в среднем 1,7. Распределение основных ионов в гидрохимическом составе ледяного булгунняхы Песцовое в определенной мере соответствует трехчленной модели формирования ядра.

Рецензируемая статья несомненно будет интересна и полезна мерзлотоведам и грунтоведам. Данная статья заслуживает внимания научного сообщества, рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика». Существенных замечаний в статье не выявлено.

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Сулейманов А.А. Якутская комплексная экспедиция Академии наук СССР 1925–1930 гг. и вопросы изучения многолетнемерзлых пород // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.73852 EDN: AISEJL URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=73852

Якутская комплексная экспедиция Академии наук СССР 1925–1930 гг. и вопросы изучения многолетнемерзлых пород

Сулейманов Александр Альбертович

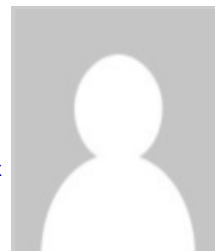
ORCID: 0000-0001-8746-258X

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 "История освоения Арктики и Антарктики"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.2.73852

EDN:

AISEJL

Дата направления статьи в редакцию:

28-03-2025

Дата публикации:

18-05-2025

Аннотация: В работе рассматривается малоизученный аспект реализации крупнейшей по масштабам и задачам научно-исследовательской инициативы своего времени – Якутской комплексной экспедиции Академии наук СССР 1925 – 1930 гг. Целевой установкой исследования является реконструкция истории аккумулирования участниками данной экспедиции сведений, касающихся осмысления феномена многолетнемерзлых пород. На основе материалов, выявленных в архивных и музейных фондах гг. Москвы, Санкт-Петербурга и Якутска, в том числе, впервые вводимых в научный оборот, привлечения опубликованных по итогам работы экспедиции документов, показана история изысканий, проведенных в шахте Шергина в г. Якутске.

Представлены наиболее репрезентативные выводы, сделанные исследователями в ходе работы в ряде административных округов Якутской АССР, в первую очередь, в составе отрядов сельскохозяйственной направленности. В методологическом отношении данная статья базируется в основном на применении специально-исторических подходов к научному познанию: принципе историзма, историко-типологическом, историко-сравнительном и историко-генетическом методах. В результате проведенных исследований представлена история аккумуляирования участниками Якутской комплексной экспедиции сведений о многолетнемерзлых породах, сделаны выводы о значении выполненных изысканий. В этой связи установлено, что несмотря на отсутствие специализированного геокриологического отряда, неудавшуюся попытку организации планомерного научного изучения феномена «вечной мерзлоты», участники экспедиции получили комплекс важных сведений, характеризующих специфику и масштабы протекания некоторых криогенных процессов. В частности, они свидетельствуют о значительной активности термокарста в пределах земель сельскохозяйственного назначения в первой четверти XX в. Значительный интерес представляет также отмеченные участниками Якутской комплексной экспедиции примеры традиционного знания сельского населения Якутии в отношении некоторых особенностей формирования термокарстовых форм рельефа, которые впервые в историографии позволили сделать определенные сопоставления в отношении степени соответствия современным представлениям о криогенных процессах.

Ключевые слова:

Арктика, Якутия, Академия наук СССР, многолетнемерзлые породы, геокриология, комплексная экспедиция, шахта Шергина, термокарст, история науки, интеллектуальное освоение

Введение

7 апреля 2025 г. исполнилось 100 лет со дня организации одной из выдающихся инициатив в истории научного изучения Якутии – Якутской комплексной экспедиции Академии наук (ЯКЭ АН) СССР. В течение 1925–1930 гг. исследованиями участников этой экспедиции были охвачены все административные округа региона. Ученые, в число которых входил без преувеличения цвет отечественной науки своего времени (академики В.Л. Комаров, Ф.Ю. Левинсон-Лессинг, С.Ф. Ольденбург, А.Е. Ферсман и др.), рассмотрели обширный круг вопросов – от комплекса медико-санитарных проблем и разнообразных этнографических сюжетов до задач транспортно-логистического плана и выявления месторождений полезных ископаемых.

Подобная многовекторность проведенных исследований, очевидно, является основной причиной того, что несмотря на выход в свет монографических работ Ю.Н. Ермолаевой [\[12\]](#) и Е.П. Виттенбург [\[6\]](#), целого ряда научных статей, в рамках которых рассматривались как вопросы разработки в рамках экспедиции каких-то конкретных проблем [\[2; 8; 10; 18; 23; 28 и др.\]](#), так и значение деятельности отдельных личностей [\[5; 11\]](#), история организации и проведения ЯКЭ АН СССР насчитывает достаточно серьезное число «белых пятен». В данном отношении показательно, что при подобной исследовательской активности, а также том факте, что по итогам работы экспедиции значительная часть полученных результатов была достаточно оперативно опубликована [\[7; 9; 15; 17; 29 и др.\]](#), аккумуляированные участниками инициативы материалы продолжают вводиться в научный

оборот [\[4\]](#).

Одной из малоизученных страниц в истории выполнения изысканий в рамках ЯКЭ АН СССР, являются работы, так или иначе относящихся к осмыслению феномена многолетнемерзлых пород (ММП). В данном отношении имеется только статья Р.М. Каменского, в которой была обозначена часть из основных результатов изысканий, проведенных участниками ЯКЭ АН СССР [\[14\]](#).

Вместе с тем, как известно, практически вся Якутия относится к зоне сплошного распространения «вечной мерзлоты». На территории региона мерзлота достигает своей максимальной мощности. Именно с изысканиями, выполненными на территории Якутии, связывают начало научного изучения феномена «вечной мерзлоты». В 1844 г. в г. Якутске к проведению «точных наблюдений над температурой земли в Шергинской шахте» приступил будущий академик А.Ф. Миддендорф [\[16, с. 22\]](#). Шахта, в которой он работал, была заложена в 1828 г. купцом Ф.Е. Шергиным в целях получения источника качественной питьевой воды. По мере углубления шахты ей заинтересовалось научное сообщество, по инициативе которого, несмотря на потерю надежды на достижение изначальной цели, работы продолжались до глубины в 116,4 м и были завершены в 1837 г. На основе проведенных измерений А.Ф. Миддендорф рассчитал глубину промерзания грунтов в районе г. Якутска [\[13, с. 17-18\]](#).

В условиях современных климатических трансформаций, которые интенсифицировали процессы деградации «вечной мерзлоты» на территории целого ряда населенных пунктов Якутии и землях сельскохозяйственного назначения [\[3; 26; 30\]](#), обращение к материалам, позволяющим пролить свет на недавнее по геологическим меркам прошлое данной проблематики, на опыт реагирования и адаптации человека к вызовам подобного плана, как представляется, имеет существенную актуальность.

В этой связи целью данного исследования является реконструкция истории аккумулирования участниками Якутской комплексной экспедиции АН СССР сведений, касающихся многолетнемерзлых пород.

Материалы и методы

В источниковом отношении в основе разработки темы лежат, в первую очередь, документы, выявленные в ходе работы в Архиве РАН (г. Москва) и его Санкт-Петербургском филиале, фотосвидетельства из фондов Якутского государственного объединенного музея истории и культуры народов Севера им. Ем. Ярославского (ЯГОМ, г. Якутск) и Российского государственного архива экономики (РГАЭ, г. Москва), а также материалы, опубликованные по итогам работы ЯКЭ АН СССР. При обработке указанных материалов использовались, в основном, специально-исторические методы научного познания: принцип историзма, историко-типологический, историко-сравнительный и историко-генетический методы. Кроме того, определенную роль, прежде всего, в интерпретации данных, полученных участниками ЯКЭ АН СССР от местного населения, сыграли подходы, лежащие в основе разрабатываемого автором и его коллегами направления историко-антропологических изысканий – антропологии холода. В рамках антропологии холода «холодные» материи Земли рассматриваются не только как вызов, но и как источник дополнительных возможностей для населения северных территорий [\[24\]](#).

Результаты и обсуждение

Непосредственная исследовательская деятельность в рамках ЯКЭ АН СССР началась в мае 1925 г. В течение первых двух с половиной лет изыскания осуществлялись в рамках 10 комплексных и специализированных отрядов: геоморфологического, гидрологического, аэрометеорологического, агрономического, ихтиологического, охотничье-промыслового, лесо-экономического, экономического, медико-санитарного и этнографического. Отряды в свою очередь были разделены на 24 подотряда. В полевых работах в рамках этих отрядов и подотрядов участвовали 246 научных и научно-технических работников, которые преодолели в ходе выполненных маршрутов более 130 тыс. км, обследовав Алданский, Булунский, Верхоянский, Вилюйский, Колымский, Олекминский и Якутский округа (рис. 1). В 1925–1926 гг. основные усилия участников ЯКЭ АН СССР были сосредоточены на территории Центральнаякутской равнины, в последующем – в центральных и северных районах Якутии [\[8, с. 459\]](#).



Рис. 1. Участники ЯКЭ АН СССР в маршруте, 1925 г. АРАН. Ф. 1569. Оп. 2. Д. 141. Л. 26.

Работы в шахте Шергина. Как видно из отмеченного, в рамках ЯКЭ АН СССР не был создан специальный геокриологический отряд. Не имелось в ее составе и отдельного подотряда соответствующей направленности. Тем не менее, ряд работ, в большей или меньшей степени относящихся к научному познанию феномена «вечной мерзлоты», был выполнен. Так, именно деятельность участников ЯКЭ АН СССР позволила внести определенный вклад в восстановление шахты Шергина. После завершения исследований А.Ф. Миддендорфа в г. Якутске систематические наблюдения в шахте прекратились и она постепенно приходила в упадок. В 1928 г. по поручению Совещания по вопросу исследования вечной мерзлоты в Якутской АССР были проведены работы, целью которых являлось определение пригодности использования шахты в качестве экспериментальной основы для учреждения в г. Якутске постоянной мерзлотной станции. Работами руководил и.о. начальника Якутской геофизической обсерватории, начальник аэрометеорологического отряда ЯКЭ АН СССР В.А. Новский [\[19, л. 1\]](#).

В ходе обследования участникам предприятия удалось осмотреть ствол шахты, проверить возможность спуска в нее при наличии технического оборудования, которое имелось тогда в г. Якутске. Кроме того, при обследовании были произведены отдельные наблюдения.

Некоторые детали проведенных работ сохранились в письме, которое было написано В.А. Новским и адресовано ученому секретарю руководившей работой ЯКЭ АН СССР Комиссии по изучению Якутской автономной советской социалистической республики (КЯР) П.В. Виттенбургу: «Спуск в шахту был произведен два раза, после того, как убедились рядом опытов, что углекислый газ в шахте отсутствует. Первый спуск 26

августа был произведен с целью очистки ствола шахты от льда, образовавшегося на стенках, что необходимо было сделать для безопасности дальнейших спусков. При весьма примитивном оборудовании, в шахту спустился принявший горячее участие в работах столяр ЯКЭ АН СССР Г. Гулин, которому с большим риском удалось достичь дна. Спуск производился в бадье при помощи ветхого деревянного ворота, бадья привязывалась к пеньковому канату, довольно толстому, но сомнительному по своей прочности. Первый спуск показал, что шахта для производства работ вполне пригодна, но первый спуск также показал, что при наличии нашего оборудования дальнейшие спуски производить нельзя. Гулин отказался от дальнейших спусков» [\[19, л. 2\]](#).

Опасность спуска заключалась в том, что предназначенный для этих целей ворот к тому времени серьезно обветшал и расшатался. Помимо этого, пеньковый канат, который использовали при спуске, ранее «долгое время употреблялся на речных работах» и «изрядно подопрел». Указывал В.А. Новский и на еще одну проблему – ворот был очень тяжелым для подъема бадьи со стоящим в ней человеком. В результате приходилось привлекать для этих целей 8 человек, которые, тем не менее, «с трудом вращали ворот» [\[19, л. 2 об.\]](#) (рис. 2).



Рис. 2. Спуск клетки в шахту Шергина, г. Якутск, 1939 г. Фото П. Бороздина. РГАЭ. Ф. 82. Оп. 2. Д. 98. Л. 35.

Несмотря на первоначальный отказ, 30 августа 1928 г. в шахту Шергина, глубина которой на тот момент составляла 99 м (часть шахты была завалена льдом и поленьями), вновь спустился Г. Гулин. В ходе спуска он составил описание ствола шахты (габариты на различных глубинах, характеристика грунтов на различных глубинах до показателя в 91 м). Кроме того, был произведен отбор образцов льда и горных пород, также взятых на разных глубинах. Позднее В.А. Новский произвел их описание. Одновременно был выполнен отбор проб для последующего микробиологического анализа. На глубинах 10, 30, 50, 70, 90 и 99 м Г. Гулин осуществил также замеры температуры воздуха. Например, на глубине 10 м этот показатель составил $-7,4^{\circ}\text{C}$, на глубине 50 м – $-5,4^{\circ}\text{C}$, на 99 м в случае, когда термометр был подвешен на гвозде у стены, температура равнялась $-3,6^{\circ}\text{C}$ и $-4,1^{\circ}\text{C}$, когда же он располагался на одном из камней, которыми была завалена нижняя часть шахты [\[19, л. 4–17 об.\]](#).

После этих двух спусков В.А. Новский «вынужден был отказаться от мысли провести

сразу же работы по организации наблюдений», в том числе, из-за достаточно высокой степени риска и того факта, что выданное Горсоветом для организации спуска во временное пользование оборудование пришлось вскоре вернуть [\[19, л. 2 об.\]](#). Тем не менее, в целях проведения регулярных геотермических наблюдений в шахте Шергина были приобретены электрические томографы [\[19, л. 39\]](#).

Вместе с тем, исходя из выявленных на данный момент сведений, подобные наблюдения в шахте Шергина организованы не были. Вполне возможно, что свою роль в этом сыграла позиция геолога С.Г. Пархоменко, посетившего ее в 1920 г. В подготовленной статье «К вопросу о возобновлении геотермических наблюдений в Шергиной шахте» С.Г. Пархоменко скептически отнесся к целесообразности проведения подобных наблюдений – шахту затапливало и заваливало землей. В результате в ней, на его взгляд, сформировались условия, достаточно далекие от естественных. В этой связи ученый посчитал, что «лучше вырыть новые шахты», а участникам ЯКЭ АН СССР «нужно не заикливаться только на геотермических наблюдениях, а иметь в виду всестороннее познание мерзлотного процесса» [\[19, л. 39-50\]](#).

Наблюдения за термокарстом. Подобное всестороннее познание феномена «вечной мерзлоты» в рамках ЯКЭ АН СССР организовать не удалось, однако участники ее отрядов собрали в ходе своих исследований данные, которые характеризовали различные стороны протекания криогенных процессов, а также получили сведения, позволяющие в некоторой степени сопоставить имевшие в тот период соответствующие знания у местного населения и формирующиеся научные представления.

В частности, начальник экономического отряда ЯКЭ АН СССР Н.В. Воленс при выполнении изысканий на территории современного Амгинского улуса отметила следующее: «Оставление пашни на несколько лет в залежи и, наконец, забрасывание ее практикуется очень широко. Во многих случаях забрасывание пашен бывает совершенно неизбежно. Например, там, где расчищенная из-под леса пашня, через несколько лет обработки, дает, вследствие таяния подпочвенного льда провалы и образует овраги – это встречается довольно часто» [\[1, л. 68\]](#).

Участники агрономического отряда ЯКЭ АН СССР, также работавшие в Лено-Амгинском междуречье, фиксировали образование термокарстовых озер («провального происхождения»), в том числе, происходившее непосредственно «на их глазах». При этом они отмечали, что образование некоторых из таких озер население связывало с расчистками под пашни: «именно указывают, что расчистки частью могут быть использованы под посевы лишь пять-шесть лет, после чего начинает изменяться рельеф, образуются западины, в которых застаивается вода, а потом и озеро» [\[20, л. 26\]](#). Таким образом, со слов местного населения описаны стадии развития термокарста, которые через три десятилетия обозначил в своей классической монографии П.А. Соловьев: формирование на начальном этапе из-за вытаивания подземного льда западин (былары), которые позднее соединяются, что ведет к появлению небольших озер (дюёдя). Затем после еще нескольких стадий формируются аласы – безлесые плоские котловины округлой формы [\[22, с.12-15\]](#).

Одному из участников агрономического отряда К.А. Бенуа недалеко от с. Бютейдях Мегинского улуса в местечке Биетек удалось заснять озеро (рис. 2), «образовавшееся на месте расчистки под пашню, произведенной 55 лет тому назад – одну из первых в тайге – под названием Оксобутях (что значит “место драки”, потому что по преданию запахать удалось после преодоления хозяином серьезных противодействий со стороны

остального населения). Пашня на этом месте просуществовала лишь 15 лет, после чего провалилась, в настоящее время в этом озере водятся караси» [\[20, л. 26\]](#).



Рис. 3. Развитие термокарста в окрестностях с. Бютейдах Мегинского улуса Якутского округа, 1926 г. Автор К.А. Бенуа. ЯГОМИИКНС, ЯГОМ КПФ-8540.

В плане оценки масштабов распространения термокарста характерна следующая ремарка исследователей: «Не столько может быть значительное, оно указывается по этому району населением повсюду» [\[20, л. 26\]](#).

Интересно также, что ученым удалось в этой связи зафиксировать наличие у местного населения определенного уровня познаний об особенностях развития термокарста. Так, в подготовленном по итогам проведенных изысканий отчете отмечалось: «Объясняется местными стариками это (активизация термокарста – А.С.) таким образом, что в результате сведения при расчистке леса почва сильнее прогревается, слой мерзлоты начинает сверху подтаивать и в результате почва проваливается, а вода выступает наверх» [\[20, л. 26\]](#). В плане точности отмеченного народного знания показательно, что именно с удалением теплоизолирующего напочвенного покрова и вырубкой древесного покрова, имеющим следствием нарушение теплобалансового режима земной поверхности и ее более сильное прогревание под воздействием прямых солнечных лучей, авторы монографии «Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии» связывают наиболее интенсивные повышения температуры ММП, ведущие к потере их устойчивости и последующему развитию термокарста [\[3, с. 144\]](#).

В плане соотнесения традиционного знания коренных народов о «вечной мерзлоте» и имевшегося на момент проведения ЯКЭ АН СССР научного представления о специфике криогенных процессов достаточно показательны выводы, сделанные руководителем почвенного подотряда профессором А.А. Красюком и его участником Г.Н. Огневым в результате изысканий, проведенных в Лено-Амгинском междуречье в 1925 г. Исследователи отметили широкое распространение «аласных пространств», которые являлись «наиболее характерной особенностью данной местности» [\[15, с. 113\]](#). Формирование аласов, по мнению названных авторов, происходило «путем провалов и оседания грунта», возникших вследствие суффозионных процессов, которые протекают «в недрах толщи известковых пород (мергелистых песчаников и известняков), подстилающих послетретичные наносы». Исследователи предположили, что провалы

образовывались под влиянием «растворяющего воздействия подземных вод». При этом лишь «до некоторой степени» на происхождение аласов могло оказывать влияние также таяние «погребенных в послетретичных осадках толщ льда...» [\[15, с. 118\]](#).

Таким образом, приведенный пример свидетельствует, что проживающие в сельских районах Якутии носители народного знания, касающегося некоторых аспектов протекания криогенных процессов, в середине 1920-х гг. имели даже более точные представления, например, о генезисе термокарстовых форм рельефа, чем отдельные ученые, включая участников ЯКЭ АН СССР. Подобное неудивительно, учитывая, что выделение геокриологии в самостоятельную отрасль научного знания специалисты связывают с выходом в свет первой специализированной монографии – работы М.И. Сумгина «Вечная мерзлота почвы в пределах СССР», состоявшейся только в 1927 г. [\[27\]](#). При этом автор предисловия к данной монографии П.И. Колосков призывал к «уничтожению мерзлоты объединенными усилиями науки и техники» [\[25, с. VIII\]](#).

Среди других зафиксированных участниками агрономического отряда ЯКЭ АН СССР народных знаний касательно особенностей организации сельскохозяйственной деятельности на «вечной мерзлоте» и развития термокарста представляют интерес также «наблюдение якутов», которое «показывает, что под густым мелким лесом провалы образуются быстрее, под редким более длительно, что объясняется различной глубиной залегающей слою мерзлоты» [\[20, л. 46\]](#). Кроме того, опять же по данным, полученным от представителей этого названного этноса, «лучшими местами для пашни в лесу являются "Чараны", повышенные сухие места под березовой рощей» [\[20, л. 46\]](#).

Если члены агрономического отряда работали, как отмечалось, на территории Лено-Амгинского междуречья, т.е. в Центральной Якутии, то А.И. Воробьев и С.А. Никитин в составе ЯКЭ АН СССР проводили исследования состояния сельского хозяйства и землепользования в южных и юго-восточных районах региона. На территории современного Усть-Майского района ими была зафиксирована следующая картина: «что касается рельефа полей, то он в общем довольно выравненный, местами наблюдается некоторое изменение его в связи с обычными в Якутии "провалами" расчисток, объясняемых подтаиванием почвенной мерзлоты» [\[21, л. 35\]](#).

Отдельные выводы о генезисе термокарстовых форм рельефа по результатам исследований, проведенных в рамках ЯКЭ АН СССР, сделал руководитель ряда отрядов экспедиции, будущий академик АН СССР, географ А.А. Григорьев (рис. 4). В частности, материалы, собранные в ходе исследований в бассейнах рр. Алдан и Вилюй в 1925–1926 г., позволили ученому выдвинуть гипотезу о том, что процесс образования аласов связан с вытаиванием фирновых ледовых образований [\[9, с. 128-138\]](#). В частности, он пришел к следующему выводу: «судя по характеру алданского ископаемого льда... происхождение этих ледяных масс должно быть связано с перекристаллизацией снега» [\[9, с. 132\]](#). Понимание роли вытаивания повторно-жильных льдов в процессе формирования термокарстового рельефа пришло в геокриологию лишь спустя полтора десятилетия.



Рис. 4. А.А. Григорьев (второй слева) в ходе полевых исследований ЯКЭ АН СССР, 1925 г. АРАН. Ф. 1569. Оп. 2. Д. 141. Л. 24.

При этом необходимо отметить, что А.А. Григорьев также зафиксировал верное в своей основе понимание местным населением генезиса термокарстовых форм рельефа: «... население центральной Якутии... настойчиво указывает на то, что некоторые озера возникли в течение последнего столетия путем протаивания поверхностной части земной коры» [\[9, с. 132\]](#).

Заключение

Таким образом, несмотря на то, что в ходе ЯКЭ АН СССР, включая работы в шахте Шергина, не удалось организовать планомерное научное изучение феномена «вечной мерзлоты», участники экспедиции смогли получить комплекс сведений, характеризующих через призму интересов развития сельского хозяйства, особенности некоторых криогенных процессов, включая термокарст. На момент изысканий ЯКЭ АН СССР термокарст был на землях сельскохозяйственного назначения в Якутии явлением достаточно распространенным. Зафиксированные при этом исследователями данные позволяют сделать выводы о значительной активности процессов вытаивания подземного льда на участках, используемых под пашни, в первой четверти XX в.

Необходимо отметить сохранившиеся благодаря скрупулезности участников ЯКЭ АН СССР интересные примеры традиционного знания представителей локальных сельских сообществ Якутии в отношении криогенных процессов и, в первую очередь, термокарста. Данные примеры свидетельствуют о том, что в некотором отношении носители этого знания на момент проведения экспедиции имели даже лучшее представление о специфике формирования термокарстовых форм рельефа, чем представители научного сообщества. В последующем это соотношение будет достаточно быстро меняться в пользу ученых не только благодаря развитию геокриологии, но и утрате в силу ряда причин сельским населением Якутии традиционных знаний. Отмеченное развитие геокриологии при этом в определенной степени опиралось на материалы, полученные в ходе исследований, проведенных в рамках Якутской комплексной экспедиции АН СССР 1925–1930 гг., которые свидетельствовали о необходимости всестороннего изучения «вечной мерзлоты» не только для эффективного развития сельского хозяйства, но и оптимизации строительства, добычи полезных ископаемых, транспортного освоения

Якутии и т.д.

Библиография

1. Архив Российской академии наук. Ф. 582. Оп. 5. Д. 95.
2. Боякова С.И. Материалы северных отрядов Якутской экспедиции АН СССР 1925-1930 гг. как источник по истории научного освоения Арктики // Арктика и Север в современных гуманитарных исследованиях: Сборник научных статей. Якутск: ИГИИПМНС СО РАН, 2018. С. 8-17. DOI: 10.25693/571.56.985.2018_002. EDN: YXPPXV.
3. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2021. 156 с.
4. Винокурова Л.И. Рукопись И.П. Сойкконена в аспекте изучения зимней повседневности якутов первой трети XX в. // Oriental Studies. 2022. Т. 15, № 3. С. 501-518. DOI: 10.22162/2619-0990-2022-61-3-501-518. EDN: UBGFNL.
5. Винокурова Л.И. Исследователь Анабара П. В. Слепцов: человек и судьба // Анабарский улус: История. Культура. Фольклор. Якутск: Бичик, 2005. С. 87-94.
6. Виттенбург Е.П. Комиссия Академии наук по изучению производительных сил Якутской АССР (1925-1930 гг.). Организация и методика работы. Якутск: Бичик, 2008. 200 с.
7. Виттенбург П.В. Якутская экспедиция Академии наук. Л., 1925. 157 с.
8. Горюшкин Л.М. Якутская комплексная экспедиция // Вестник Российской академии наук. 1996. № 5. С. 458-462.
9. Григорьев А.А. Морфология северо-восточной части Вилюйского округа. Отчет Вилюйского отряда Якутской экспедиции Академии Наук СССР в 1926 г. под начальством А.А. Григорьева. Л.: АН СССР, 1930. 167 с.
10. Десяткин Р.В. Почвенные исследования якутской экспедиции АН СССР в 1925-1930 гг. // Вестник Якутского государственного университета. 2005. № 2. С. 20-24. EDN: JXOGCP.
11. Ермолаева Ю.Н. М.К. Аммосов и организация якутской экспедиции АН СССР // Вестник Якутского государственного университета. 2005. № 1. С. 12-16. EDN: JXOFUD.
12. Ермолаева Ю.Н. Якутская комплексная экспедиция 1925-1930 гг.: развитие науки в Якутии. Новосибирск: Наука, 2001. 162 с.
13. Железняк М.Н., Климовский И.В., Шепелев В.В. Вклад академика А.Ф. Миддендорфа в становление геокриологической науки // История наук о Земле: Сборник статей. Вып. 5 / Под ред. В.А. Снытко, В.А. Широковой. М.: ООО "Арколит", 2016. С. 15-21. EDN: TMRWFW.
14. Каменский Р.М. Мерзлотные исследования Якутской экспедиции АН СССР // Итоги и развитие исследований Якутской экспедиции Академии наук: материалы научной конференции, посвященной 70-летию создания Якутской комплексной экспедиции Академии наук СССР (Якутск, 1 декабря 1995 г.) / отв. ред.: д.т.н. В.А. Шерстов. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1996. С. 61-66.
15. Красюк А.А. Почвы Ленско-Амгинского водораздела (Якутский округ). Отчет Алданского отряда Якутской экспедиции Академии наук СССР в 1925 г. под начальством А.А. Григорьева. Л.: АН СССР, 1927. 176 с.
16. Миддендорф А.Ф. Путешествие на север и восток Сибири. Ч. 1. Отд. 1. СПб: Тип. Императорской Академии наук, 1860. 188 с.
17. Недригайлов С.Н. Лесные ресурсы Ленско-Алданского плато и Заалдано-Верхоянского горного района. Л.: Изд-во АН СССР, 1928. 468 с.
18. Николаев В.П. Медико-санитарный отряд Якутской экспедиции АН СССР (1925-1926 гг.) // Наука и образование. 2006. № 2. С. 133-136.
19. Санкт-Петербургский филиал Архива РАН (СПбФ АРАН). Ф. 47. Оп. 1. Д. 927.
20. СПбФ АРАН. Ф. 47. Оп. 2. Д. 14.

21. СПбФ АРАН. Ф. 47. Оп. 2. Д. 53.
22. Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М.: АН СССР, 1959. 144 с.
23. Соломонов Н.Г. Зоологические исследования Якутской экспедиции АН СССР (1925-1930) // Вестник Якутского государственного университета. 2005. № 2. С. 37-42. EDN: JXOGDT.
24. Сулейманов А.А., Винокурова Л.И., Лыткин В.М. и др. Антропология холода: естественные низкие температуры в системе жизнеобеспечения сельских сообществ Якутии (традиционные практики, вызовы современности и стратегии адаптации). Новосибирск: Наука, 2024. 280 с. EDN: ODSKNR.
25. Сумгин М.И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. Владивосток: ДВГО, 1927. 381 с.
26. Федоров А.Н. Эволюция и динамика мерзлотных ландшафтов Якутии. Дисс. докт. геогр. наук. Якутск, 2020. 302 с.
27. Шепелев В.В. Основоположник мерзловедения профессор М. И. Сумгин в Якутии // Наука и техника в Якутии. 2013. № 2. С. 48-52. EDN: MHRBQE.
28. Ширина Д.А. Деятельность геоморфологического отряда Якутской академической комплексной экспедиции в контексте истории Колымского края. 1929-1930 гг. // Северо-Восточный гуманитарный вестник. 2011. № 2. С. 18-25. EDN: PBSBOZ.
29. Шрейбер С.Е. Медико-санитарное обследование населения Вилюйского и Олекминского округов. Л.: Изд-во АН СССР, 1931. 372 с.
30. Lytkin V., Suleymanov A., Vinokurova L. et al. Influence of Permafrost Landscapes Degradation on Livelihoods of Sakha Republic (Yakutia) Rural Communities // Land. 2021. № 10. P. 101. DOI: 10.3390/land10020101. EDN: OGSXAB.

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Рецензируемый текст «Якутская комплексная экспедиция Академии наук СССР 1925–1930 гг. и вопросы изучения «вечной мерзлоты» посвящен некоторым малоизученным аспектам деятельности Якутской комплексной экспедиции АН СССР в 1925–1930 гг. и представляет собой междисциплинарное исследование (историческое краеведение, история науки, агрономия, этнография, антропология холода) на внушительной источниковой основе (архивные материалы архивов Москвы, Якутска Санкт-Петербурга, опубликованные материалы ЯКЭ АН СССР, полевые изыскания автора и др.). Автор указывает, что при наличии обширного комплекса исследований, охватывающих разные стороны деятельности ЯКЭ АН СССР, в известной степени «белым пятном» остается осмысление феномена якутской вечной мерзлоты и ее деградации, что в современных условиях климатических трансформаций («глобальное потепление») придает исследованию существенную актуальность. Автор заявляет методологией исследования авторскую концепцию "антропологии холода" («холодные» материи Земли не только как вызов, но и как источник дополнительных возможностей для населения северных территорий), однако в контексте данной работы это скорее не методология, а один из аспектов интерпретации полученных данных, один из компонентов междисциплинарного исследования, методология же заключается в историко-архивном критическом анализе, компаративном анализе и т.д., исходя из характера источниковой базы данного исследования (отчеты и др. документы ЯКЭ, письма участников и др.). Исходя из заявленной логики автор ставит целью исследования процесс аккумуляции

участниками ЯКЭ АН СССР научных данных о «вечной мерзлоте» и ее трансформации. Автор выделяет в работах экспедиции АН СССР два основных сюжета: работы (погружения) в шахте Шергина в 1928 г. и опросы местного населения/наблюдения за состоянием термокарстовых почв; в обоих случаях описаны цели, методика и результаты проводившихся исследований. Текст сопровождается архивными фотографиями. Автор приходит к закономерному выводу о том, что в рамках ЯКЭ АН СССР не было организовано глубокое и планомерное изучение феномена якутской вечной мерзлоты, работы в шахте Шергина фактически были прерваны и признаны нецелесообразными, изучение состояния почв носило более результативный характер, причем именно здесь проявляется этнографический характер проведенных исследований (выявлены традиционные знания местных жителей о динамике состояния сельскохозяйственных угодий). Очевидно, что изучение вечной мерзлоты не относилось к числу приоритетных направлений ЯКЭ, результаты ее деятельности в данном направлении, как показано автором, довольно скромны; тем не менее рассмотрение вышеупомянутых сюжетов позволяет закрыть условные «белые пятна» в деятельности ЯКЭ АН СССР. Включение материалов исследования в современный дискурс о климатических трансформациях и антропологии холода также представляется ценным итогом данной работы. Работа рекомендуется к публикации.

Результаты процедуры повторного рецензирования статьи

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

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

История науки позволяет оценить не только научные достижения, но и подлинный героизм ученых-исследователей. И действительно, упомянем здесь средневековых медиков, под покровом ночи вскрывавших трупы на кладбищах, не забудем и про подвиги полярных путешественников, ту же гибель группы Р. Скотта. Но и на просторах России есть те районы, которые являются поистине экстремальными, мы имеем в виду районы Крайнего Севера. В этой связи вызывает интерес изучение различных аспектов истории научных экспедиций в полярные районы нашей страны.

Указанные обстоятельства определяют актуальность представленной на рецензирование статьи, предметом которой является Якутская комплексная экспедиция АН СССР в 1925-1930 гг. Автор ставит своими задачами проанализировать характер экспедиции, выявить те сведения, которые смогла собрать экспедиция.

Работа основана на принципах анализа и синтеза, достоверности, объективности, методологической базой исследования выступает системный подход, в основе которого находится рассмотрение объекта как целостного комплекса взаимосвязанных элементов. Научная новизна статьи заключается в самой постановке темы: автор стремится охарактеризовать вопросы изучения вечной мерзлоты в ходе Якутской комплексной экспедиции во второй половине 1920-х гг. Научная новизна определяется также привлечением архивных материалов.

Рассматривая библиографический список статьи, как позитивный момент следует отметить его масштабность и разносторонность: всего список литературы включает в себя 30 различных источников и исследований, что само по себе говорит о том объеме подготовительной работы, которую проделал ее автор. Источниковая база рецензируемой статьи представлена документами из фондов Архива РАН и Санкт-Петербургского филиала Архива РАНРАН, труды полярного ученого П.В. Витенбурга и т.д. Из используемых исследований укажем на работы Ю.Н. Ермолаевой и Н.Г. Соломонова, в центре внимания которых находятся различные аспекты изучения

истории Якутской комплексной экспедиции. Заметим, что библиография обладает важностью как с научной, так и с просветительской точки зрения: после прочтения текста статьи читатели могут обратиться к другим материалам по её теме. В целом, на наш взгляд, комплексное использование различных источников и исследований способствовало решению стоящих перед автором задач.

Стиль написания статьи можно отнести к научному, вместе с тем доступному для понимания не только специалистам, но и широкой читательской аудитории, всем, кто интересуется как полярными исследованиями, в целом, так и Якутской комплексной экспедицией, в частности. Апелляция к оппонентам представлена на уровне собранной информации, полученной автором в ходе работы над темой статьи.

Структура работы отличается определенной логичностью и последовательностью, в ней можно выделить введение, основную часть, заключение. В начале автор определяет актуальность темы, показывает, что одной из "малоизученных страниц в истории выполнения изысканий в рамках ЯКЭ АН СССР, являются работы, так или иначе относящихся к осмыслению феномена многолетнемерзлых пород (ММП, «вечная мерзлота»)". В работе показано, что собранные исследователями "данные позволяют сделать выводы о значительной активности процессов вытаявания подземного льда на участках, используемых под пашни, в первой четверти XX в." Примечательно, что как отмечает автор рецензируемой статьи,

"проживающие в сельских районах Якутии носители народного знания, касающегося некоторых аспектов протекания криогенных процессов, в середине 1920-х гг. имели даже более точные представления, например, о генезисе термокарстовых форм рельефа, чем отдельные ученые, включая участников ЯКЭ АН СССР".

Главным выводом статьи является то, что

"сведений, характеризующих через призму интересов развития сельского хозяйства, особенности некоторых криогенных процессов, включая термокарст".

Представленная на рецензирование статья посвящена актуальной теме, снабжена 2 рисунками, вызовет читательский интерес, а ее материалы могут быть использованы как в курсах лекций по истории России, так и в различных спецкурсах.

В целом, на наш взгляд, статья может быть рекомендована для публикации в журнале "Арктика и Антарктика".

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Ступин О.Г., Вахрушева И.А., Пчелинцева С.В., Красовская Л.В. Инженерно-геокриологическая оценка влияния добычи минерального сырья на деградацию многолетнемерзлых пород в пределах арктической криолитозоны России // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.74431 EDN: FHRFAU URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74431

Инженерно-геокриологическая оценка влияния добычи минерального сырья на деградацию многолетнемерзлых пород в пределах арктической криолитозоны России

Ступин Олег Геннадьевич

магистр; кафедра цифровых технологий управления; Сибирский федеральный университет
660041, Россия, Красноярский край, г. Красноярск, Октябрьский р-н, Свободный пр-кт, д. 79

✉ ipdme@mail.ru



Вахрушева Инна Алексеевна

кандидат педагогических наук

доцент; кафедра Высшей математики; Российский государственный аграрный университет-
Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева

127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

✉ vakhrusheva@rgau-msha.ru



Пчелинцева Светлана Вячеславовна

кандидат технических наук

доцент; кафедра Прикладной информатики; Российский государственный аграрный университет-
Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева

127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

✉ pchelintseva@inbox.ru



Красовская Людмила Владимировна

кандидат технических наук

доцент; кафедра Прикладной информатики; Российский государственный аграрный университет-
Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева

127434, Россия, г. Москва, Тимирязевский р-н, ул. Тимирязевская, д. 49

✉ kraslud@yandex.ru



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

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.2.74431

EDN:

FHRFAU

Дата направления статьи в редакцию:

13-05-2025

Дата публикации:

21-05-2025

Аннотация: Настоящее исследование посвящено инженерно-геокриологической оценке теплового воздействия добычи минерального сырья на деградацию многолетнемерзлых пород в пределах арктической криолитозоны России. Работа сосредоточена на Юньягинском угольном разрезе и прилегающих подземных шахтах Печорского угольного бассейна, включая Воргашорскую, Воркутинскую и Заполярную шахты. Эти объекты размещены в районах с повсеместным распространением многолетнемерзлых грунтов и подвержены возрастающему антропогенному тепловому воздействию, связанному с открытой и подземной добычей угля. В исследовании рассматривается, каким образом устойчивые тепловые нагрузки от производственной инфраструктуры, отвалов и вентиляционных выбросов способствуют увеличению глубины сезонного протаивания, перераспределению влаги и снижению прочностных характеристик мерзлых грунтов. Особое внимание уделено пространственной неоднородности температурных аномалий и их зависимости от технологических факторов, таких как интенсивность отработки, параметры вентиляции и температура шахтных вод. В работе использован комплексный подход, включающий натурный температурный мониторинг, бурение инженерно-геологических скважин, лабораторные испытания образцов мерзлых грунтов и численное моделирование процессов теплопереноса для оценки степени и темпов деградации многолетнемерзлых пород под тепловым воздействием. Научная новизна исследования заключается в количественной характеристике тепловых полей, формируемых в условиях промышленной эксплуатации месторождений на фоне многолетних многолетнемерзлых пород, а также в установлении пороговых условий, при которых процесс деградации существенно ускоряется. Моделирование и натурные наблюдения показали, что при плотности тепловой нагрузки, превышающей 100 Вт/м^2 , протаивание многолетнемерзлой породы достигает глубины 3–4 метра за пять лет. В зоне влияния угледобычи глубина сезонного протаивания увеличивается вдвое по сравнению с фоновыми участками и достигает 2,8 м. Отдельные очаги полной деградации многолетнемерзлых пород зафиксированы в районах размещения отвалов и сброса шахтных вод, где температура грунта превышала 0°C , а содержание влаги достигало более 35 %. Полученные результаты подтверждают необходимость внедрения инженерных мер термозащиты — теплоизолированных платформ, пассивных термосифонов и автоматизированных систем мониторинга — для снижения рисков потери устойчивости инфраструктуры и обеспечения экологически безопасного освоения Арктики.

Ключевые слова:

Арктика, многолетнемерзлые породы, деградация многолетнемерзлых пород, тепловое

воздействие, угледобыча, Юньягинский разрез, Печорский угольный бассейн, геокриология, теплоперенос, инженерная инфраструктура

1. Введение

Многолетнемерзлые породы (ММП), охватывающие значительные территории северного полушария, играют важную роль в функционировании климатической системы планеты, поддержании устойчивости инженерной инфраструктуры и сохранении углеродного баланса. В условиях глобального потепления и антропогенного воздействия деградация многолетнемерзлых пород становится одной из наиболее актуальных геоэкологических проблем [\[1-3\]](#). Особенно уязвимыми оказываются районы арктической криолитозоны, где процессы термокарста, термоэрозии и подтаивания мерзлых грунтов приводят к необратимым изменениям ландшафтов, нарушению гидрологического режима и разрушению объектов хозяйственной деятельности [\[4-6\]](#). Одним из наиболее мощных источников локального теплового воздействия в пределах криолитозоны выступает добыча минерального сырья, сопровождаемая активной эксплуатацией горнотехнической инфраструктуры, отвалов, технологических площадок и сетей теплоснабжения. На фоне высоких темпов промышленного освоения Арктики инженерно-геокриологическая оценка техногенных воздействий становится неотъемлемой частью устойчивого природопользования и проектирования в условиях многолетнемерзлых пород [\[7-10\]](#).

Одной из ключевых проблем является тепловое перераспределение в зоне горных работ, приводящее к понижению термостабильности мерзлых грунтов. При открытой добыче, особенно в условиях Арктики, происходит оголение пород, обладающих низкой теплоёмкостью и высокой теплопроводностью, что способствует быстрому прогреву подстилающего основания [\[11-13\]](#). Дополнительное тепловое воздействие оказывают экзогенные и эндогенные процессы, включая окисление сульфидных минералов в отвалах, эксплуатацию тепловыделяющего оборудования и сброс тёплых дренажных вод. Для подземной добычи ситуация усугубляется теплом, передаваемым от вентиляционного воздуха и самонагрева пород. Эти факторы в совокупности вызывают ускоренную деградацию многолетнемерзлых пород, приводящую к увеличению активного слоя, просадке грунта, потере несущей способности оснований сооружений и возникновению потенциально аварийных ситуаций [\[14\]](#). Одновременно с этим накапливаются эмиссии парниковых газов из талых участков, что дополнительно усиливает негативное влияние на климатическую систему [\[15-18\]](#).

Попытки решения данной проблемы включают в себя как конструктивные, так и природоохранные подходы. На инженерном уровне реализуются методы термостабилизации оснований с использованием сезонно-действующих или пассивных охладителей (термосифонов), применения теплоизоляционных покрытий, глубокой закладки фундаментов и отвода дренажных вод за пределы мерзлотной зоны [\[19-22\]](#). Эти меры, однако, требуют значительных затрат на проектирование, эксплуатацию и обслуживание, и в условиях удалённых арктических районов они не всегда экономически обоснованы. С другой стороны, при разработке минеральных ресурсов допускается внедрение адаптивных технологических решений, направленных на минимизацию теплового воздействия, включая изменение маршрутов транспортировки, размещение теплонагруженных объектов вне криогенно-чувствительных зон, и выбор сезонов ведения работ [\[23-25\]](#). Недостатком подобных решений является их

ограниченная эффективность при высоких объемах добычи и наличии постоянно действующих источников тепла. Кроме того, на практике нередко наблюдается расхождение между проектными и фактическими характеристиками многолетнемерзлых пород, что требует уточнённых методов оценки состояния подстилающих грунтов [\[26-27\]](#).

В этой связи всё большую актуальность приобретает применение инженерно-геокриологических методов оценки и прогнозирования деградации многолетнемерзлых пород под влиянием теплового воздействия горных разработок. Использование геотермического зондирования, термометрии, многолетнего мониторинга температуры и численного моделирования позволяет более точно определить динамику температурного поля, границы таяния и зону потери прочностных свойств мерзлых грунтов [\[28-30\]](#). Сочетание наблюдательных и расчетных методов даёт возможность учёта как локальных факторов (глубина отработки, мощность перегретых пластов, конструкция отвалов), так и региональных тенденций, связанных с потеплением климата. Интеграция таких подходов в систему проектирования и эксплуатации горных предприятий в Арктике открывает перспективы для оптимизации технологических решений и повышения устойчивости инфраструктуры в условиях многолетнемерзлых пород [\[31,32\]](#).

Настоящая работа направлена на инженерно-геокриологическую оценку влияния добычи минерального сырья на деградацию многолетнемерзлых пород в пределах арктической криолитозоны России. Исследование сосредоточено на анализе теплового воздействия, создаваемого Юньягинским угольным разрезом, расположенным в районе Воркуты, а также рядом действующих угольных шахт, входящих в состав Печорского угольного бассейна. Целью работы является определение характера, интенсивности и пространственного распределения теплового влияния указанных объектов на состояние мерзлотных грунтов, выявление факторов, определяющих масштаб деградации, и оценка потенциальных рисков для инженерных сооружений и природной среды. Проведённое исследование охватывает анализ температурного режима, геокриологических характеристик района, особенностей технологии добычи и позволяет сформулировать практические рекомендации по снижению техногенной нагрузки на многолетнемерзлые породы в условиях развития добывающей отрасли Арктики.

2. Методика и методы проведения исследований.

В рамках данного исследования была реализована комплексная программа полевых и лабораторных инженерно-геокриологических работ, направленных на определение степени и характера теплового воздействия горнодобывающей деятельности на состояние многолетнемерзлых грунтов в пределах арктической криолитозоны. Экспериментальные работы охватывали участки Юньягинского угольного разреза и прилегающих шахт Печорского угольного бассейна, включая Воргашорскую, Воркутинскую и Заполярную шахты. Основное внимание было уделено зонам непосредственного воздействия тепловых источников, а также удалённым фоновым участкам, которые использовались в качестве контрольных точек для сопоставительного анализа.

Инструментальная часть исследований включала бурение инженерно-геологических скважин с отбором температурных, геотехнических и гидрологических данных. Для термометрического мониторинга применялись цифровые геотермические датчики НОВО U23 Pro v2 с диапазоном измерения от -40 до $+70^{\circ}\text{C}$ и точностью $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, которые устанавливались в скважины глубиной до 20 м на фиксированных интервалах по 0,5–2 м. Измерения проводились в автоматическом режиме с шагом регистрации 1 раз в час в

течение не менее 6 месяцев. Дополнительно использовались кабельные термозонды с интегральной регистрацией температурного градиента (марки «ГеоТерм-5М», производство ООО «ТехноИнжиниринг», Россия). Эти устройства позволяли оперативно оценивать распределение температуры по глубине в реальном времени с разрешением до $0,1^{\circ}\text{C}$. Участки бурения выбирались с учётом литологической однородности, расстояния до источников тепла и доступности для последующего геодезического мониторинга.

Полевые работы дополнялись лабораторными исследованиями проб мерзлотных грунтов, отобранных из 46 скважин. Испытания проводились на автоматизированных установках ИГИ-3000 и ЦНИИС-95М, предназначенных для оценки физико-механических характеристик мерзлых образцов. Параметры, полученные в лабораторных условиях, включали влажность, пористость, модуль упругости, сопротивление сдвигу и коэффициент фильтрации. Испытания выполнялись при температуре -5°C в камерах с термостабилизацией, имитирующих естественные условия криолитозоны. Отдельно проводился анализ содержания жидкой и связанной влаги при помощи влагомеров Sartorius MA160, что позволило определить фазовые изменения в пределах переходного слоя многолетнемерзлой породы.

Для моделирования теплового поля использовалось специализированное программное обеспечение GeoStudio (модуль TEMP/W), обеспечивающее численное решение уравнений теплопереноса с учётом фазовых переходов. В расчётах применялись параметры, полученные в полевых и лабораторных условиях, включая теплопроводность, теплоёмкость и скрытую теплоту плавления. Модельная сетка имела шаг $0,5\text{ м}$, а временной шаг составлял 10 суток, что позволило достоверно отследить развитие температурных аномалий и зону деградации многолетнемерзлых пород в течение прогнозного периода до 25 лет. Полученные результаты легли в основу анализа пространственного распространения теплового воздействия и сформировали базу для оценки рисков для инженерных сооружений.

3. Результаты исследования

В ходе настоящего исследования была выполнена инженерно-геокриологическая оценка теплового влияния угледобывающих объектов Печорского угольного бассейна, сосредоточенная на Юньягинском угольном разрезе (рис. 1) и прилегающих шахтах, включая Воргашорскую, Воркутинскую и Заполярную. Исследование проводилось на основе инструментального мониторинга температуры мерзлых грунтов, анализа геотермальных полей, термометрического бурения, сейсморазведочных работ и моделирования динамики теплового воздействия в зоне влияния техногенной нагрузки. Полигон наблюдений включал участки в радиусе до 4 км от центра карьера, а также контрольные точки в пределах $8\text{--}10\text{ км}$, не затронутые деятельностью угледобычи, и использовался в качестве фона для установления базового температурного режима.



Рисунок 1. Добыча угля на Юньягинском угольном разрезе.

Экспериментальные данные показали значительное повышение температуры грунтов в пределах зоны активной деятельности Юньягинского разреза. В пределах 500 метров от кромки карьера среднегодовая температура на глубине 2 метров составила $-0,4^{\circ}\text{C}$, в то время как на контрольных участках аналогичного геолого-литологического строения она не превышала $-2,1^{\circ}\text{C}$. На глубине 5 метров температурные аномалии были ещё более выражены: в пределах зоны влияния температура достигала $-0,1^{\circ}\text{C}$, в то время как фоновое значение составляло $-1,7^{\circ}\text{C}$. Максимальное проникновение положительных температур фиксировалось на глубине до 7,5 метров в точках, расположенных вблизи складов угля и площадок хранения техники, что связано с аккумуляцией тепла и теплопередачей через поверхностный слой. Дополнительно, на глубинах 10 и 15 м наблюдалось отклонение изотерм до $+0,3^{\circ}\text{C}$ от расчетных значений, определённых для многолетнемёрзлой толщи.

Сравнительный анализ температуры в 32 точках наблюдений показал, что среднее превышение температуры в зоне Юньягинского карьера по сравнению с контрольной составляет $1,52^{\circ}\text{C}$, что подтверждает интенсивное локальное тепловое воздействие. Также наблюдалось расширение зоны сезонного протаивания: средняя глубина активного слоя увеличилась с 1,4 м (фон) до 2,8 м (зона влияния), что соответствует росту более чем на 100 %. Отдельные участки показали признаки частичного или полного протаивания многолетнемёрзлых грунтов. Так, вблизи северо-восточной отвалочной зоны, в районе, где средняя плотность размещения вскрышных масс достигала 2200 кг/м^3 , фиксировалось исчезновение многолетнемерзлых пород на глубине до 4,2 метров. При этом среднегодовая температура здесь колебалась от $-0,2$ до $+0,4^{\circ}\text{C}$, а содержание жидкой влаги достигало 36 %, что более чем в 1,5 раза превышает фоновые значения.

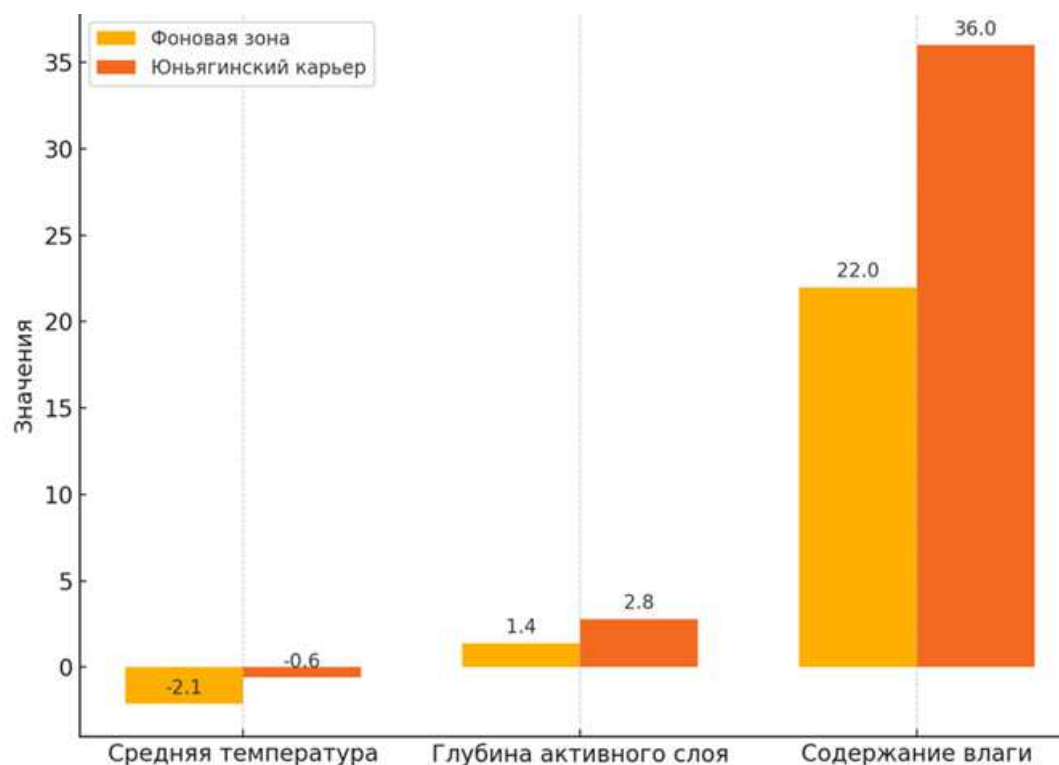


Рисунок 2. Сравнительный анализ мерзлотных характеристик.

Анализ проб, отобранных из 46 буровых скважин, показал изменение влажности многолетнемерзлых пород: если в контрольных точках влажность составляла 18–22 %, то в зоне прогрева она увеличивалась до 30–34 %, а в отдельных местах до 38 %, что свидетельствует о фазовом переходе льда в воду. Изменение физических свойств грунта сопровождалось снижением модуля упругости с 42 МПа до 23–27 МПа. Полевые лабораторные испытания показали падение сопротивления сдвигу на 31 %, особенно в зонах с влажностью выше 35 %.

На участках вблизи вентиляционных стволов и выработанных пространств шахт было зафиксировано наиболее интенсивное поступление тепла с глубин. Термопрофили, построенные по результатам замеров на глубинах до 20 м, показали повышение геотермического градиента с фона 2,9 °C/100 м до 5,3 °C/100 м вблизи Воргашорской шахты (Рис. 3), особенно в районе вентиляционных выходов. Измерения температуры воздуха, выбрасываемого шахтными вентиляторами, показали, что даже в зимний период его температура составляла +6,2°С при температуре наружного воздуха –29,5°С. Дебит вентиляционных потоков достигал 180–220 тыс. м³/ч, создавая зону устойчивого теплового воздействия до 125 метров от устья ствола. Расчёты по модели теплопереноса в многолетнемерзлых породах показали, что зона горизонтального воздействия вентиляционных выбросов может достигать до 140 метров при глубинном прогреве до 10–14 метров за 15–20 лет эксплуатации.

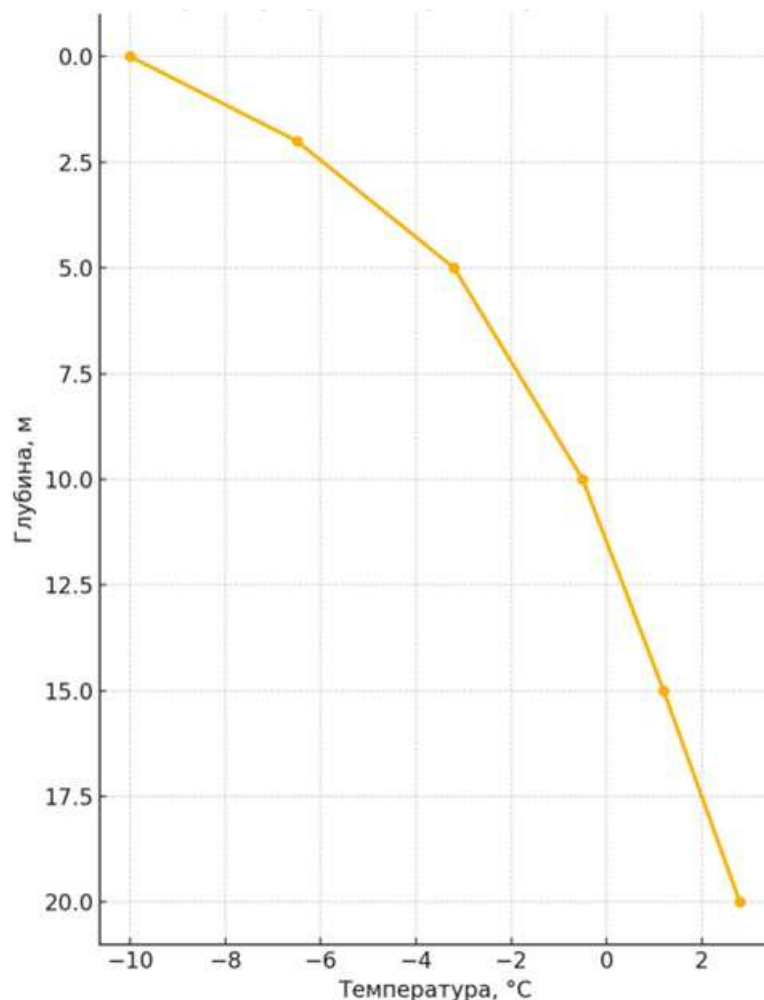


Рисунок 3. Термопрофиль Воргашорской Шахты.

Численное моделирование распространения тепла методом конечных разностей по расчётной сетке с шагом 0,5 м, при использовании теплофизических параметров ($\lambda = 1,4$ Вт/(м·К), $C = 2,2 \cdot 10^6$ Дж/(м³·К), $L = 3,34 \cdot 10^8$ Дж/м³), показало, что полное протаивание многолетнемерзлых пород на глубину 6–8 м вблизи зон интенсивной эксплуатации (технологические дороги, углепогрузочные площадки) возможно за 17–21 год. В зонах максимальной концентрации тепловой нагрузки (инфраструктурные узлы, теплообменные станции, насосные) глубина прогрева может превышать 9,5 м. При этом отмечалась чёткая корреляция между плотностью теплового потока и глубиной протаивания: при мощности 80–100 Вт/м² глубина деградации составляла 1,8–2,4 м, при 120–150 Вт/м² — до 3,1–3,8 м за 5 лет.

Анализ временного хода температуры по данным автоматизированных станций (всего 9 установок) за период 2016–2024 гг. показал устойчивый тренд к повышению. Среднегодовая температура на глубине 1,5 м возросла с $-1,6^{\circ}\text{C}$ до $-0,7^{\circ}\text{C}$, а в верхнем 0,5-метровом слое почвы достигла $+0,2^{\circ}\text{C}$. В зимне-весенний период температура в зонах дренажа и сброса шахтных вод возрастала на $1,2$ – $1,4^{\circ}\text{C}$ выше фонового уровня. Зафиксированная температура дренажных вод составляла $+2,5$... $+4,8^{\circ}\text{C}$ при среднем суточном объёме сброса 520 м³. Это теплоэнергетическое воздействие эквивалентно локальной нагрузке в 30–35 МВт·ч/сутки, что обусловило ускоренное протаивание на глубину до 4,2 м в зонах прилегающих к каналам отвода.

Геодезический мониторинг, выполненный на базе GNSS-станций и инклинометрических зондов, выявил просадки поверхности до 14,2 см в пределах участков, где наблюдалось полное исчезновение многолетнемерзлых пород на глубинах 2–3 м. Осадки

сопровождались локальными деформациями грунтов основания с потерей несущей способности. Коэффициент сцепления снизился с фонового значения 38 кПа до 21–24 кПа, а модуль деформации уменьшился с 22 до 13 МПа. В зонах интенсивного протаивания зафиксировано увеличение пористости на 8–12 %, что создаёт дополнительные риски для устойчивости инфраструктурных объектов.

На основании полученных результатов можно провести комплексный анализ температурного режима, геокриологических характеристик исследуемого района, технологических особенностей угледобычи, а также сформулировать рекомендации, направленные на снижение техногенной тепловой нагрузки на многолетнемерзлые породы в условиях активного освоения арктических территорий.

Температурный режим района Юньягинского разреза и прилегающих шахт характеризуется не только локальным потеплением верхних слоев грунта, но и перераспределением теплового потока в вертикальном и горизонтальном направлении. По данным модельной реконструкции теплового баланса, за последние 15 лет произошло смещение изотермы 0°C вниз в среднем на 1,8 м, а зона термической аномалии расширилась радиально на 220–270 м вокруг основных источников тепла. Это свидетельствует о формировании устойчивого техногенного теплового поля. Выявлена закономерность: при увеличении средней плотности тепловой нагрузки на поверхности выше 90 Вт/м² наблюдается экспоненциальный рост глубины деградации многолетнемерзлых пород, что связано с нелинейной теплопроводностью влажных грунтов в переходной фазе между твёрдым и жидким состоянием.

Анализ геокриологических свойств показал, что температурная пластичность многолетнемерзлых пород резко возрастает при приближении к фазовому переходу льда, особенно в зонах с высокой долей илистых частиц (более 35 % в составе). Это приводит к усиленной деформации в зонах с пониженной прочностью: в трещиноватых и лёссовидных горизонтах. Также обнаружено, что в зонах термического воздействия повышается коэффициент фильтрации более чем в два раза (с $1,1 \cdot 10^{-6}$ до $2,5 \cdot 10^{-6}$ м/с), что усиливает инфильтрацию тёплых вод и способствует формированию вторичных очагов деградации на периферии активных зон.

Технологические особенности добычи также продемонстрировали влияние на пространственную структуру теплового воздействия. Анализ аэротермографических снимков, выполненных в период летнего максимума солнечной инсоляции, показал, что температура поверхности пород на отвалах достигает +22,5°C, тогда как в ненарушенных участках — не превышает +14°C. В ночное время отвалы сохраняют температуру выше +12°C на протяжении более 6 часов, в то время как фоновые участки остывают до +5...+7°C. Это создаёт суточную асимметрию теплового обмена, способствующую накоплению энергии и постепенному прогреву подстилающих грунтов.

Наибольшая тепловая нагрузка в шахтных районах зафиксирована в местах размещения трансформаторных подстанций, компрессорных и насосных станций, где тепловыделение составляет 35–40 кВт на единицу площади 100 м². Именно в этих точках зарегистрированы локальные аномалии температуры на глубинах 1,5–3,0 м. Анализ температурных кривых показал, что вблизи таких объектов достигается не только прогрев, но и формируется многолетний цикл колебаний температур с низкой амплитудой и высокой инерцией, что препятствует восстановлению многолетнемерзлых пород даже в зимний период.

Одним из ключевых результатов работы стало установление зависимости между

структурой инженерной нагрузки и формой теплового поля. Линейно-протяжённые источники (технологические дороги, дренажные каналы) создают овально-удлинённые зоны прогрева с направленной миграцией тепла вдоль продольной оси. Точечные источники (склады топлива, энергообъекты) формируют симметричные поля с концентрированным ядром. Такое разграничение позволяет более точно моделировать тепловой режим и прогнозировать зоны максимального риска.

С целью уменьшения теплового влияния рекомендуется переход к модульным конструкциям технологической инфраструктуры с минимизированной теплопередающей площадью. Например, использование утеплённых платформ вместо открытых стоянок позволяет снизить локальную тепловую нагрузку до 55–60 Вт/м². Также перспективно внедрение полимерных световозвращающих покрытий на отвалах, уменьшающих альбедо поверхности до 0,6 и понижающих дневную температуру поверхности на 4–5°C по сравнению с тёмными техногенными отложениями. Так же возможно применение рекуперационных теплообменников на вентиляционных системах шахт, что позволяет возвращать до 35 % тепловой энергии, снижая температуру выбросов на 2,3–3,1°C. В совокупности с поэтапной автоматизацией вентиляции, работающей в зависимости от термогидравлических условий в выработанных пространствах, это может сократить глубину деградации многолетнемерзлых пород на 12–18 % в перспективе 10 лет эксплуатации.

Таким образом, проведённый анализ подтвердил, что тепловое воздействие на многолетнемерзлую породу в условиях промышленной эксплуатации в Арктике носит комплексный и многофакторный характер, а его смягчение требует одновременно инженерных, климатических и проектных решений. Только системный подход, объединяющий термогидрологический мониторинг, оптимизацию архитектуры инфраструктуры и внедрение энергосберегающих технологий, способен обеспечить устойчивое развитие добычи в криолитозоне без необратимого разрушения мерзлотных массивов.

4. Выводы.

Полученные данные в работе для арктической криолитозоны Юньягинского угольного разреза и шахт Воркуты подтвердили, что эксплуатация угольных месторождений сопровождается формированием устойчивых техногенных тепловых полей, приводящих к перераспределению температуры в толще мерзлых грунтов. Значительное повышение температуры на глубинах от 2 до 15 метров вблизи промышленных объектов свидетельствует о прогрессирующей деградации многолетнемерзлых пород, сопровождающейся расширением активного слоя, увеличением влажности, снижением прочностных характеристик грунта и развитием осадочных деформаций. Выявленные температурные аномалии устойчиво коррелируют с плотностью размещения отвалов, мощностью вентиляционных потоков, а также интенсивностью сброса дренажных вод. Установлено, что глубина деградации многолетнемерзлых пород может достигать 9,5 м при средней тепловой нагрузке 120–150 Вт/м² и сроке воздействия более 15 лет. Кроме того, подтверждён вклад подземных источников тепла, таких как шахтная вентиляция и тепловыделяющее оборудование, в формирование вертикального прогрева грунтов.

Численные модели распространения тепла в мерзлотных условиях подтвердили, что термодинамическое поведение многолетнемерзлых грунтов существенно зависит от их литологического состава, фазового состояния влаги и режима поступления тепла. Особое внимание уделено зонам с высоким содержанием илистых частиц и повышенной

влажностью, где наблюдаются наиболее выраженные процессы протаивания и потери устойчивости основания. Геодезический мониторинг выявил просадки поверхности до 14,2 см, что свидетельствует о необходимости пересмотра проектных решений при размещении объектов на термоактивных участках. Также доказано, что формы распространения тепловых аномалий различаются в зависимости от конфигурации источников: точечные источники образуют концентрированные ядра прогрева, а линейные — удлинённые зоны с направленной миграцией тепла. Такой подход к типологизации термического влияния открывает новые возможности для моделирования и зонирования рисков.

Практическая значимость работы заключается в формировании рекомендаций по оптимизации технологических решений в условиях криолитозоны. Обоснована эффективность перехода к модульным конструкциям, применения световозвращающих покрытий, изолированных дренажных каналов и пассивных охладителей (термосифонов) в сочетании с автоматизированным геотермальным мониторингом. Полученные данные могут служить основой для принятия проектных решений в сфере инженерной геокриологии, устойчивого природопользования и оценки рисков для инфраструктуры в Арктике.

Библиография

1. Walter K.M., Chanton J.P., Chapin F.S. III, Schuur E.A.G., Zimov S.A. Methane production and bubble emissions from Arctic lakes: Isotopic implications for source pathways and ages // *Journal of Geophysical Research*. 2006. Vol. 111, G03003.
2. Михайлова И.А., Петрова Е.В. Исследование накопленного экологического ущерба от добычи угля на участках Печорского каменноугольного бассейна по данным дистанционного зондирования // *Экологический мониторинг и охрана окружающей среды*. 2022. № 4. С. 33-40.
3. Seasonal Increase of Methane Emissions Linked to Warming Permafrost // *Nature Climate Change*. 2022. URL: <https://www.nature.com/articles/s41558-022-01512-4> (дата обращения: 15.05.2025).
4. Кузьмина О.А., Соловьев А.А. Угольная промышленность и экология: баланс или дисбаланс // *Экономика и экология природопользования*. 2021. № 3. С. 45-52.
5. Сидоров В.П., Иванова Н.С. Климатические особенности и статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории Севера России // *Климат и экология*. 2023. № 2. С. 15-22.
6. Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C., et al. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. Vol. 520, pp. 171-179. DOI: 10.1038/nature14338 EDN: UFRKWZ.
7. Александров Д.М., Кузнецова Т.И. Экология угольной промышленности: состояние, проблемы, пути решения // *Геоэкология*. 2020. № 5. С. 60-68.
8. Петров И.В. Снижение загрязнения окружающей среды отходами обогащения на шахтах Печорского угольного бассейна : дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2019. 148 с. EDN: QLYKXI.
9. Pfeiffer E.-M., Grigoriev M.N., Liebner S., Beer C., Knoblauch C. Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost // *Nature Climate Change*. 2018. Vol. 8, pp. 309-312. DOI: 10.1038/s41558-018-0095-z EDN: XXLNTN.
10. Turetsky M.R., Abbott B.W., Jones M.C., Walter Anthony K., Olefeldt D., Schuur E.A.G., Grosse G., Kuhry P., Hugelius G., Lawrence D.M., Gibson C., Sannel A.B.K., McGuire A.D. Carbon release through abrupt permafrost thaw // *Nature Geoscience*. 2020. Vol. 13, pp. 138-143. DOI: 10.1038/s41561-019-0526-0 EDN: ZVQSNT.
11. Николаев С.А., Орлова Е.М. Современное изменение климата и реакция криолитозоны на примере Западной Сибири и Европейского Севера России //

Климатология и география. 2021. № 3. С. 25-32.

12. Иванов К.В., Соколова М.А. Влияние изменения климата на вечную мерзлоту и инженерную инфраструктуру Крайнего Севера : дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2020. 152 с.

13. Arctic Industrialization: How Will It Impact Delicate Ecosystems? // Earth.com. 2024. URL: <https://www.earth.com/news/arctic-industrialization-how-will-it-impact-delicate-ecosystems/> (дата обращения: 15.05.2025).

14. Walker T.R., Crittenden P.D., Dauvalter V.A., Jones V., Kuhry P., Mikkola K., Nikula A., Patova E., Ponomarev V.I., Pystina T., Rätti O., Solovieva N., Stenina A., Virtanen T., Young S.D. Multiple indicators of human impacts on the environment in the Pechora Basin, north-eastern European Russia // Ecological Indicators. 2009. Vol. 9, pp. 765-779. DOI: 10.1016/j.ecolind.2008.09.008 EDN: LLYBWZ.

15. Семенов П.И., Козлова Н.В. Влияние загрязняющих веществ, попадающих в почву, на состояние окружающей среды в районах угледобычи // Экологическая безопасность. 2021. № 4. С. 55-62.

16. Lantuit H., Pollard W.H., Couture N.J., Fritz M., Schirmermeister L., Meyer H., Hubberten H.-W. Coastal erosion driven by climate change and its impact on permafrost degradation in the Arctic // Geophysical Research Letters. 2012. Vol. 39, L22402.

17. A Transdisciplinary, Comparative Analysis Reveals Key Risks from Permafrost Thaw // Communications Earth & Environment. 2024. URL: <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01883-w> (дата обращения: 15.05.2025).

18. Морозова Е.С., Лебедев А.Ю. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Экономика и управление. 2023. № 2. С. 30-38.

19. Rapidly Increasing Industrial Activities in Arctic // ScienceDaily. 2024. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2024/10/241021170349.htm> (дата обращения: 15.05.2025).

20. Koven C.D., Lawrence D.M., Riley W.J. Permafrost carbon-climate feedback is sensitive to deep soil carbon decomposability but not deep soil nitrogen dynamics // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2015. Vol. 112, pp. 3752-3757.

21. Natali S.M., Schuur E.A.G., Mauritz M., Schade J.D., Celis G., Crummer K.G., Johnston C., Krapek J., Pegoraro E., Salmon V.G., Webb E.E., Wilson C.J. Permafrost thaw and soil moisture driving CO₂ and CH₄ release from upland tundra // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2015. Vol. 120, pp. 525-537. DOI: 10.1002/2014JG002872 EDN: RQPVXI.

22. Is Methane Release from the Arctic Unstoppable? // MIT Climate Portal. 2024. URL: <https://climate.mit.edu/ask-mit/methane-release-arctic-unstoppable> (дата обращения: 15.05.2025).

23. Zimov S.A., Schuur E.A.G., Chapin F.S. Permafrost and the global carbon budget // Science. 2006. Vol. 312, pp. 1612-1613. DOI: 10.1126/science.1128908 EDN: LJZGOT.

24. Тарасов А.Н., Смирнова Л.П. Развитие угледобычи в Печорском бассейне: потенциал, перспективы, возможности // Горная промышленность. 2022. № 6. С. 40-47.

25. Schädel C., Bader M.K.-F., Schuur E.A.G., Biasi C., et al. Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils // Nature Climate Change. 2016. Vol. 6, pp. 950-953. DOI: 10.1038/nclimate3054 EDN: XTUBUV.

26. Thawing Permafrost: What Does It Mean? And What Can Be Done? // Salata Institute, Harvard University. 2024. URL: <https://salatainstitute.harvard.edu/thawing-permafrost-what-does-it-mean-and-what-can-be-done/> (дата обращения: 15.05.2025).

27. Trace Metals in Surface Water of the Pechora River and Its Tributaries // Marine Pollution Bulletin. 2023. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X23007518> (дата обращения: 15.05.2025).

28. Thawing Permafrost Releases Industrial Contaminants into Arctic // Environmental Health Perspectives. 2023. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10971047/> (дата обращения: 15.05.2025).

29. NASA Helps Find Thawing Permafrost Adds to Near-Term Global Warming // NASA Jet Propulsion Laboratory. 2024. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasa-helps-find-thawing-permafrost-adds-to-near-term-global-warming/> (дата обращения: 15.05.2025).

30. The Arctic Is a Freezer That's Losing Power // WIRED. 2023. URL: <https://www.wired.com/story/the-arctic-is-a-freezer-thats-losing-power/> (дата обращения: 15.05.2025).

31. This Critical Ecosystem Helped Keep Climate Change in Check. Now It's Making Things Worse // Vox. 2024. URL: <https://www.vox.com/climate/390530/arctic-tundra-carbon-sink-emitter-climate-change> (дата обращения: 15.05.2025).

32. Arctic Tundra Is Now Emitting More Carbon Than It Absorbs, US Agency Says // The Guardian. 2024. URL: <https://www.theguardian.com/world/2024/dec/10/arctic-tundra-carbon-shift> (дата обращения: 15.05.2025). ""

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Предметом изучения является инженерно-геокриологическая оценка влияния добычи минерального сырья на деградацию вечной мерзлоты в пределах арктической криолитозоны России.

Актуальность исследования бесспорна, так как одним из наиболее мощных источников локального теплового воздействия в пределах криолитозоны выступает добыча минерального сырья. На фоне высоких темпов промышленного освоения Арктики инженерно-геокриологическая оценка техногенных воздействий становится неотъемлемой частью устойчивого природопользования и проектирования в условиях мерзлоты. В этой связи всё большую актуальность приобретает применение инженерно-геокриологических методов оценки и прогнозирования деградации вечной мерзлоты под влиянием теплового воздействия горных разработок. Статья посвящена инженерно-геокриологической оценке влияния добычи минерального сырья на деградацию вечной мерзлоты в пределах арктической криолитозоны России. Исследование сосредоточено на анализе теплового воздействия, создаваемого Юньягинским угольным разрезом, расположенным в районе Воркуты, а также рядом действующих угольных шахт, входящих в состав Печорского угольного бассейна.

Методология исследования основана на применении полевых и лабораторных инженерно-геокриологических методов, а также методов геотермического зондирования, термометрии, многолетнего мониторинга температуры и численного моделирования. Инструментальные исследования включали бурение инженерно-геологических скважин с отбором температурных, геотехнических и гидрологических данных. Для термометрического мониторинга применялись цифровые геотермические датчики НОВО U23 Pro v2 и кабельные термозонды с интегральной регистрацией температурного градиента марки «ГеоТерм-5М». Лабораторные исследования проб мерзлотных грунтов (из 46 скважин) проводили на автоматизированных установках ИГИ-3000 и ЦНИИС-95М. Анализ содержания жидкой и связанной влаги проводили при помощи влагомеров Sartorius MA160. Для моделирования теплового поля ис-

пользовалось специализированное программное обеспечение GeoStudio (модуль TEMP/W).

Научная новизна исследований заключается в том, что авторами впервые выполнена инженерно-геокриологическая оценка теплового влияния угледобывающих объектов Печорского угольного бассейна, сосредоточенная на Юньягинском угольном разрезе.

Стиль статьи – научный, изложение грамотное. Объем и структура статьи полностью соответствуют требованиям журнала «Арктика и Антарктика». Имеется иллюстративный и графический материал, что делает статью более доступной к восприятию и анализу данных. Автором показано, что на участках вблизи вентиляционных стволов и выработанных пространств шахт было зафиксировано наиболее интенсивное поступление тепла с глубин. Экспериментальные данные показали, что имеется значительное повышение температуры грунтов в пределах зоны активной деятельности Юньягинского разреза. В пределах 500 метров от кромки карьера среднегодовая температура на глубине 2 метров составила $-0,4^{\circ}\text{C}$, в то время как на контрольных участках аналогичного геолого-литологического строения она не превышала $-2,1^{\circ}\text{C}$.

В качестве пожелания хочется отметить, что в разделе 3 «Результаты исследования» нужно провести редактирование первого абзаца, где автор повторно указывает цель исследования: «Целью экспериментальной части работы было определение пространственно-временной динамики деградации.....». В целом, существенных замечаний в статье не отмечается.

Библиография статьи солидная и включает в себя 30 литературных источников, в том числе 19 - на иностранном языке. Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на литературные источники.

Выводы в статье достаточно четкие и конкретные, соответствуют теме исследования. Автором доказано, что эксплуатация угольных месторождений арктической криолитозоны Юньягинского угольного разреза и шахт Воркуты сопровождается формированием устойчивых техногенных тепловых полей, приводящих к перераспределению температуры в толще мерзлых грунтов. Значительное повышение температуры на глубинах от 2 до 15 метров вблизи промышленных объектов свидетельствует о прогрессирующей деградации мерзлоты, сопровождающейся расширением активного слоя, увеличением влажности, снижением прочностных характеристик грунта и развитием осадочных деформаций.

Практическая значимость работы несомненна и заключается в формировании рекомендаций по оптимизации технологических решений в условиях криолитозоны; обоснована эффективность перехода к модульным конструкциям и применения световозвращающих покрытий, изолированных дренажных каналов и пассивных охладителей (термосифонов) в сочетании с автоматизированным геотермальным мониторингом.

Данная статья будет полезна широкому кругу ученых и специалистов в области грунтоведения и мерзлотоведения. Статья рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика».

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Ли Ч., Брушков А.В., Чеверев В.Г., Ло Ю., Соколов А.В. Механизм выбросов метана при поверхностном замерзании осенью // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.74170 EDN: ZDFPCD
URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74170

Механизм выбросов метана при поверхностном замерзании осенью

Ли Чэнчжэн

аспирант; кафедра Геокриология; Московский государственный университет им. МВ. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, р-н Раменки, тер. Ленинские Горы, д. 1

✉ lichenzheng0912@gmail.com



Брушков Анатолий Викторович

доктор геолого-минералогических наук

зав. кафедрой; кафедра геокриология; Московского государственного университета им. МВ. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1

✉ brouchkov@hotmail.com



Чеверев Виктор Григорьевич

доктор геолого-минералогических наук

зав. кафедрой; кафедра геокриология; Московского государственного университета им. МВ. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1

✉ cheverev44@mail.ru



Ло Юньхан

аспирант; кафедра геокриология; Московского государственного университета им. МВ. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1

✉ lyhmsu@mail.ru



Соколов Андрей Владимирович

Главный инженер - ведущий специалист по газоаналитической технике (приборам); ООО «НИИИТ»

123592, Россия, г. Москва, Кулакова, 20

✉ sok44@yandex.ru



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

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.2.74170

EDN:

ZDFPCD

Дата направления статьи в редакцию:

20-04-2025

Дата публикации:

11-06-2025

Аннотация: В настоящее время одной из глобальных экологических проблем является глобальное потепление, вызванное повышенной концентрацией парниковых газов в атмосфере. Метан является одним из ключевых газов, влияющих на климатические изменения. Концентрация метана значительно увеличилась в атмосфере за последние 20 лет и продолжает увеличиваться до сих пор. Ученые и политики всего мира обеспокоены данной проблемой и ищут способы решения глобального потепления. Под общей тенденцией глобального потепления изучение характеристик выбросов метана в промерзающих породах имеет большое значение для точной оценки и прогнозирования содержания парниковых газов в атмосфере. Предметом данного исследования является механизм выброса метана при поверхностном замерзании в осенний период времени. Объектом данного исследования является выброс метана в условиях замерзания. В данной работе в качестве метода исследования выбросов метана рассматривается уникальный программный комплекс Solidworks, который предполагает его использование в таких направлениях, как инженерная геология, мерзлотоведение, грунтоведение и др. Научная новизна данного исследования заключается в том, что в нем разрабатываются механизмы выброса метана при изменении температуры осенью с разных поверхностей: с поверхности водоемов и с поверхности почвы, также в статье предлагаются методы по контролю данного механизма и управлению метановыми выбросами при сезонном похолодании. Кроме того, представлена сравнительная таблица факторов, влияющих на выбросы метана в водоемах и почве при поверхностном замерзании осенью. Делается вывод о возможности приведения данных факторов к единому знаменателю и применению ко всем элементам экосистемы. Для разработки механизмов выбросов метана в данной работе были изучены актуальные научные и опытные исследования последних пяти-десяти лет, такие как замеры метана в торфяниках Китая и Японии, на озере Кортковское (Польша), на Северной Аляске, в тундре и условиях вечной мерзлоты. Результатами данного исследования являются схемы выбросов метана при замерзании почвы и водоема в осенний период времени. Было выявлено, что факторы влияющие на метаногенез и для почвы, и для водоемов имеют схожее происхождение, что связано с тем, что они находятся в одной экосистеме.

Ключевые слова:

выбросы метана, парниковый эффект, изменения климата, геология, повышение

температуры, поверхностное замерзание, механизм выброса метана, глобальное потепление, метан, замерзание почвы

Введение

По данным Межправительственной панели по изменению климата (IPCC), метан имеет глобальный парниковый потенциал, который в среднем в 28–34 раза превышает показатели углекислого газа (CO_2), на протяжении ста лет [\[1\]](#). В представленном в конце 2023 г. Сводном отчете МГЭИК отмечается, что причина глобального потепления на $1,1^\circ\text{C}$ в 2011–2020 гг. в сравнении с периодом 1850–1900 гг. стала хозяйственная деятельность человека [\[2\]](#). В Отчете отмечается, что отсутствие действий по сокращению парникового эффекта от хозяйственной деятельности человека приведет к глобальному потеплению на $1,5^\circ\text{C}$ в течение ближайших 20 лет. Это увеличит риск всех опасностей и негативных последствий для жизни на Земле при изучении всех возможных смоделированных ситуациях.

Одним из катализаторов парникового эффекта является метан (CH_4), который выделяется в том числе из естественных экосистем, таких как водоемы и почвы. Стоит разделять эмиссии и выбросы CH_4 . Эмиссия характеризуется небольшим выделением CH_4 в атмосферу, тогда как выброс подразумевает выделение большего количества метана. Проблемой данного исследования является то, что полностью механизмы выброса метана при замерзании не до конца изучен [\[3\]](#).

Также в этом исследовании представлены современные методы и программы для оценки воздействия на окружающую среду, для проведения термического анализа, а также для трехмерного моделирования проектов и картографических исследований. На данном этапе развития геологии, геоэкологии и грунтоведения такие современные решения могут стать частью комплекса мер по снижению углеродного следа.

Данное исследование посвящено изучению механизмов выброса CH_4 при замерзании поверхности водоемов и поверхности почв. Задачами исследования являются: определение факторов, влияющих на интенсивность выбросов CH_4 , изучение физико-химических процессов, происходящих в период замерзания, оценка влияния температуры и других условий на выделение CH_4 .

Стоит отметить, что исследование механизма выбросов метана в период замерзания осенью важно не только с точки зрения экологии и экосистемы, но и для того, чтобы разработать адекватные меры мониторинга профилактики и управления климатическими рисками. Есть две стратегии поведения комитетов по климату правительств разных стран: «стратегия митигации» (стратегия уменьшения последствий) и «стратегия адаптации» (подстраивание под новые условия) [\[4\]](#). Для реализации той или иной стратегии необходимо иметь достаточный и релевантный инструментарий, который и рассматривается в данной статье. Таким образом, данное исследование может быть актуальным для решения глобальных экологических и климатических проблем [\[5\]](#).

При проведении исследования применены методы систематического обзора литературы, сравнительный метод, метод визуализации, синтез.

Выбросы метана и факторы изменения климата

Водоемы, особенно в северных широтах, являются существенными источниками эмиссии и выброса CH_4 . Метан образуется в водоемах в результате анаэробного разложения органических веществ и донных отложений. Этот процесс обычно активируется различными факторами, такими как изменение температуры, повышение доступности органического материала, динамика химических условий в воде. Часто учеными рассматриваются арктические регионы, в которых сосредоточены большие массы льда, подверженные изменениям в связи с глобальным потеплением [\[6, 7, 8\]](#).

Таким образом, самые значительные выбросы CH_4 случаются тогда, когда происходит изменение температуры, поэтому особенно актуальным является рассмотрение механизмов выброса метана в осенний период, когда происходит замерзание и таяние льдов. Это оказывает значительное влияние на динамику метановых выбросов, водоемы покрываются ледяной коркой, которая таким образом задерживает CH_4 , а затем, когда происходит резкое потепление, это приводит к выбросу. Для науки особенно важными являются расчеты силы выброса CH_4 в зависимости от тех или иных факторов.

Разберем, какие факторы влияют на процесс выброса метана в водоемах (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение факторов, влияющих на метаногенез в водоемах и почвах

Фактор	Влияние на метаногенез в водоемах	Влияние на метаногенез в почвах	Данные
<i>Температура</i>	Низкие температуры замедляют метаногенез, высокие ускоряют и способствуют выбросу. [9]	Низкие температуры замедляют метаногенез, высокие ускоряют и способствуют выбросу. [10]	Так, при температуре ниже 0°C скорость выработки метана снижается до 50%, а при повышении температуры до $25-30^\circ\text{C}$ - увеличивается на 30-40%. [11]
<i>Содержание органических веществ</i>	Высокое содержание органических веществ (например, планктон, растительность) содействуют образованию CH_4 . [9,11]	Высокое содержание органических веществ (например, торф, растительность) содействуют образованию CH_4 . [10]	Так, в заболоченных районах с высоким уровнем растительного разложения концентрация метана может превышать 200 мг/м^2 в сутки. В океане во время цветения планктона уровень CH_4 может вырасти на 30-40%. Что касается почв, то если масса органического материала составляет более

			5%, то выбросы метана увеличиваются до 40%. [10,11]
<i>Уровень воды</i>	Высокий уровень повышает метаногенез. [9]	Высокий уровень грунтовых вод повышает метаногенез. [10,11]	Затопленные поля или болотистые территории отличаются высоким уровнем выброса метана - примерно 200-500 мг CH ₄ /м ² в сутки, при этом в засушливых почвах выбросы составляют всего 20-50 CH ₄ /м ² . [11]
<i>Тип среды</i>	Различные водоемы могут иметь разные состав донных отложений, который влияет на метаногенез. [9]	Различные типы почвы по-разному влияют на производство и накопление CH ₄ . [10]	В заболоченных озерах с органическим составом донных отложений выбросы метана могут достигать 300-600 мг CH ₄ /м ² в сутки, при этом в водоемах с минеральными донными отложениями (например, горные озера), выбросы могут составлять менее 50 мг CH ₄ . [11]
<i>Состояние микробиоты</i>	Микроорганизмы в водоемах влияют на метаногенез. [9]	Микроорганизмы в почве влияют на метаногенез. [10]	Наличие органики и концентрация метаногенных бактерий может увеличивать скорость метаногенеза до 200-400 мг CH ₄ /м ² в сутки. [10, 11]
<i>Толщина</i>	Толщина ледяного покрова влияет	Толщина льда и промерзшего слоя	Если толщина ледяного покрова составляет 1-1,5 м, то скорость выброса метана может составлять всего 5-

льда	на уровень накопления и выброса CH_4 . [9,10]	почвы влияет на уровень накопления и выброса CH_4 . [10]	15 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2$ в сутки. при толщине менее 30 см выбросы метана могут достигать 100-300 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2$ в сутки. [11]
Осадки и уровень снег	Осадки, в том числе накопившийся на замерзшем водоеме снег, влияют на метаногенез. [9]	Осадки, в том числе слой снега на почве, влияют на метаногенез. [10]	При снежном покрове в 10-20 см скорость выброса метана достигает 50-150 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2$ в сутки, в водоемах и почвах без снега - только 20-50 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2$ в сутки. [11]

Из табл. 1 видно, что факторы и для почвы, и для водоемов имеют схожее происхождение, что связано с тем, что они находятся в одной экосистеме. Эти факторы, которые могут изменить процесс эмиссии и выбросов метана при замерзании. Также в последние годы появляются и другие, более сложные модели, которые могут изучать выбросы метана в течение длительного времени или с учётом пространственных изменений. Так, норвежские ученые предложили концептуальную модель, которая устанавливает эндогенную и взаимоусиливающую связь между уязвимостью, насилием и воздействием на изменение климата [\[12\]](#).

Несмотря на сделанный вывод, исследования последних лет в различных регионах мира показывают, что общего понимания механизма метановых выбросов не существует [\[13\]](#). Большие различия наблюдаются в зависимости от региона и динамики выбросов. Так, северные высокоширотные водно-болотные земли тундры вносят существенный вклад в общие выбросы CH_4 . Отмечено, что выбросы падают после вегетационного периода и значительно увеличиваются в период замерзания, причем их количество примерно равно выбросам в течение всего летнего сезона [\[14\]](#).

Исследования в Северной Аляске в течение шестнадцати лет привели к выводу, что осенние повышения выброса CH_4 коррелируют с более поздним замерзанием почвы, что связано с тем, что температура почвы держится около 0°C перед замерзанием [\[15\]](#). Еще одно исследование позволило наблюдать повышенные концентрации CH_4 и CO_2 в почве и воздухе в процессе замерзания почвы и росте снежного покрова при отсутствии вечной мерзлоты [\[16\]](#).

Четырехлетние измерения на озере Ильмензее показали, что хранение CH_4 сильно отличается по годам. Если в 2012 году годовой максимум был 5250 кг метана, то в 2013 году – 2013 кг метана. Ученые установили, что это не связано с наличием или отсутствием кислорода в воде или температурой осадков, а связано с поступлением в водоем органических веществ, в частности, с цветением фитопланктона, который способен хранить метан в течение года [\[17\]](#).

Исследования на польском озере Коровское в течение четырех лет также

продemonстрировали различия в среднегодовых значения, однако они не были большими: средние выборы в 2019, 2020, 2021 и 2022 гг.. составили 13,7, 10,1, 11,8 и 11,6 мг соответственно. Основными факторами влияния на выбросы были названы температура воды и температура воздуха. Исследование позволяет прогнозировать увеличение выбросов CH_4 более чем на 30% к 2100 году [\[18\]](#).

На торфянике равнины Саньцзян в Китае было зафиксировано значительное увеличение выбросов CH_4 в период замерзания и оттаивания [\[19\]](#). Период весеннего таяния снега также вызывает большой выбор CH_4 на торфянике на Хоккайдо в Японии [\[20\]](#).

Трансформация механизмов выбросов метана при поверхностном замерзании почвы и воды

Для сбора данных можно использовать сенсоры для изменения концентрации метана в воде, например, газоанализатор и инверсионные камеры. Также для исследования состава воды и донных отложений можно использовать пробоотборники. Для измерения температуры воды и льда – специальные термометры. Также применяется изотопный метод при наблюдении за пространственно-временным распределением атмосферного CH_4 [\[21\]](#).

Рассмотрим детально механизм выброса CH_4 при поверхностном замерзании водоема осенью:

1. Начало осеннего сезона, что ведет к понижению температуры воздуха.
2. Понижение температуры воздуха ведет к постепенному понижению температуры воды.
3. Понижение температуры воды приводит к замерзанию водоема и началу процесса образования льда на поверхности водоема.
4. Ледяной барьер на поверхности водоёма приводит к ограничению газообмена между водой и атмосферой.
5. Из-за ледяного барьера происходит естественное накопление CH_4 в воде и в донных отложениях.
6. Смена температуры приводит к таянию льда и образованию трещин ледяного покрова на водоеме.
7. Происходит выброс CH_4 в атмосферу через трещины во льду.
8. Воздействие метана на атмосферу, увеличение его концентрации в атмосфере, что способствует парниковому эффекту.

Представим этот механизм в виде наглядной схемы (рис. 1):

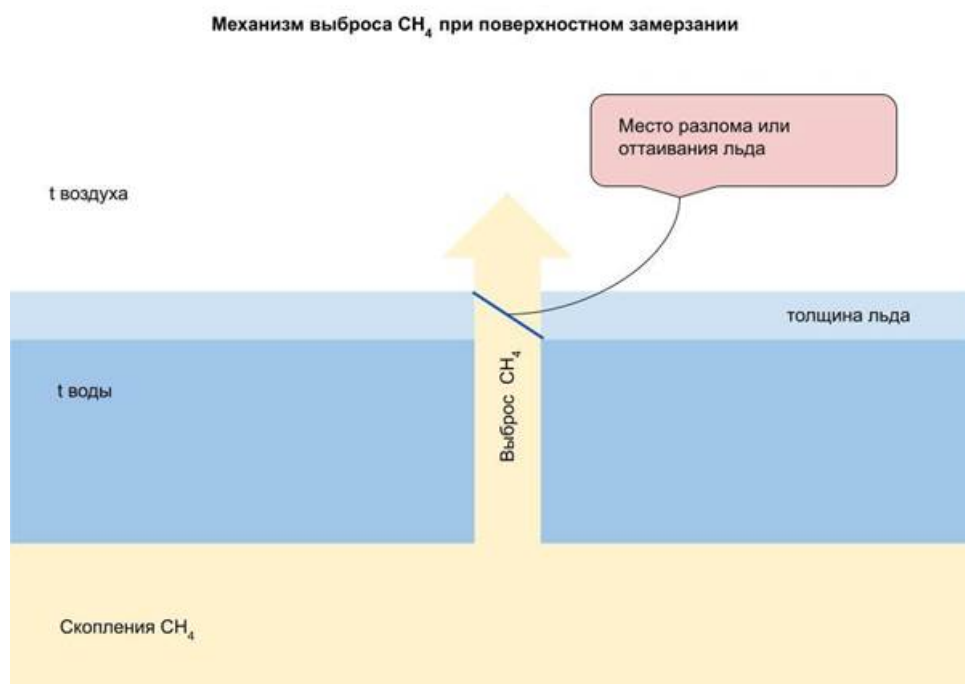


Рис. 1. Механизм выброса метана при поверхностном замерзании водоема (разработано автором).

Поскольку ранее мы выяснили, что механизм выброса CH_4 при поверхностном замерзании почвы является таким же, можно отнести описание и схему и к этой части экосистемы. Вода на рисунке может быть заменена на почву, под которой находятся скопления метана. В месте разлома или оттаивания льда происходит выброс CH_4

Методы исследования механизмов выброса метана и их предупреждения

Для глубокого исследования механизмов выброса CH_4 на местности геологам и картографам необходимо использовать современное оборудование, а также инновационное программное обеспечение. Одним из примеров такого ПО является уникальный программный комплекс Solidworks [22], который предполагает его использование в таких направлениях, как инженерная геология, мерзлотоведение, грунтоведение и др.

Общая ситуация механизмов выброса метана в природе можно описать в следующей классификации:

1. Разложение органики. В условиях недостатка кислорода, например, в болотах, торфяниках и на дне водоемов, микробы разлагают органические вещества, выделяя метан как побочный продукт. Крупный рогатый скот и другие травоядные выделяют метан в процессе пищеварения (метаногенез) через отрыжку. В почвах, особенно в условиях высокой влажности, некоторые микроорганизмы могут производить метан в процессе разложения органических веществ.. Разложение растительности в условиях, когда кислород ограничен, также может приводить к образованию метана.

2. Подводные отложения. Метан может находиться в форме гидратов на дне океанов и в арктических регионах. При изменении давления или температуры эти гидраты могут разлагаться, высвобождая метан в атмосферу.

3. Тектоническая активность. В некоторых регионах метан может выделяться из недр

Земли в результате геологических процессов, таких как разломы и вулканическая активность.

Человеческая техносфера тоже может способствовать выбросу метана в атмосферу. Хотя это не совсем природный механизм, стоит отметить, что некоторые выбросы метана происходят из природных источников, таких как нефтяные и газовые месторождения, где метан может утекать в атмосферу.

Измерение выбросов метана сложно, особенно в удаленных или труднодоступных районах: большие пространства и сложные геологические наложения крайне неудобны для исследований. Это затрудняет оценку масштабов проблемы и разработку эффективных стратегий. Уровни выбросов могут варьироваться в зависимости от времени года, погодных условий и других факторов, что делает мониторинг еще более сложным, внедрение технологий для упреждения выбросов метана может требовать значительных инвестиций. Например, в сельском хозяйстве могут потребоваться новые методы управления скотом и кормами, или по изучению микрофлоры почв, химического состава литосферы, поиска косвенных маркеров возможных выбросов газа. Разработка и внедрение новых технологий, таких как системы улавливания метана на свалках или в животноводстве, могут быть сложными и требовать времени, затраты на фундаментальную науку в рамках грантовой системы небольшие, бизнес и государство хочет быстрый результат (в итоге не имея никакой).

SOLIDWORKS Sustainability выявит факторы воздействия на окружающую среду в режиме реального времени. Результаты отображаются в Панели оценки экологического воздействия, которая динамически обновляется при внесении изменений.

Пользовательские отчеты позволяют представить полученные результаты для всеобщего пользования.

Так, инженеры используют специальное расширение программы Solidworks Sustainability, которая имеет панель оценки экологического воздействия в режиме реального времени. Она позволяет отображать оценку воздействия предпринимаемых действий или разрабатываемого проекта на окружающую среду по двум разным методологиям оценки: CML или TRACI. Первый метод используется по умолчанию и предназначен для региональных климатических условий европейских государств, второй метод основан на данных о природных и климатических условиях Северной Америки.

Программа Solidworks Sustainability позволяет производить расчет основных экологических индикаторов: углеродного следа, потребления энергии, загрязнения воды и окисления воздуха. В оценку углеродного следа входит оценка углекислого газа и метана. Углеродный след отображается в виде диаграмм, которые демонстрируют степень воздействия и выражается в процентах. Кроме того, это программное обеспечение позволяет сравнить эффект новых параметров с эффектом тех параметров, которые были применены ранее (рис. 2).

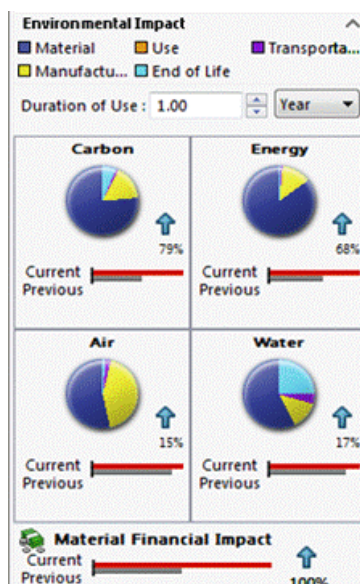


Рис. 2. Показатели воздействия на окружающую среду в программе Solidworks (источник — сайт Solidworks).

Рассмотрим другие методы изучения механизмов выбросов метана, которые позволяют определять залежи скопления газов и предотвращать их воздействие на озоновый слой. Так, для распознавания газовых факелов в Мировом океане на глубине от нескольких десятков метров до нескольких километров ученые используют акустический метод. В частности, применяются усовершенствованные судовые эхолоты, такие как «Сарган-ЭМ», «ELAC LAZ-72», гидролокаторы «Сарган-ГМ», а также многоканальная система цифровой регистрации акустических сигналов.

Так, в 2021 г. группа исследователей опубликовала результаты исследований потока метана из газовых факелов, проведенных на борту НИС «Академик М. А. Лаврентьев» в Охотском море на глубине 2220 м. Они наблюдали за количеством выделяемого метана в течение 2012–2018 гг. и выявили прямую связь между выбросами метана и глубинными землетрясениями, произошедшими в Охотском море [\[23, 24, 25\]](#).

Подобный гидроакустический комплекс из современных эхолотов, гидролокаторов и специального программного обеспечения позволяет осуществлять сбор акустической информации при вертикальном зондировании. Это бережный метод, который не нарушает естественное состояние газовых факелов, позволяя собирать о них всю необходимую информацию. Эхолоты работают вертикально на разных частотах, сканируя водную толщу и морское дно [\[26\]](#). Гидролокаторы могут осуществлять сканирование под любым углом, что в совокупности дает максимальный обзор изучаемой области. Результат отображается в виде детальных эхограмм (рис. 3).

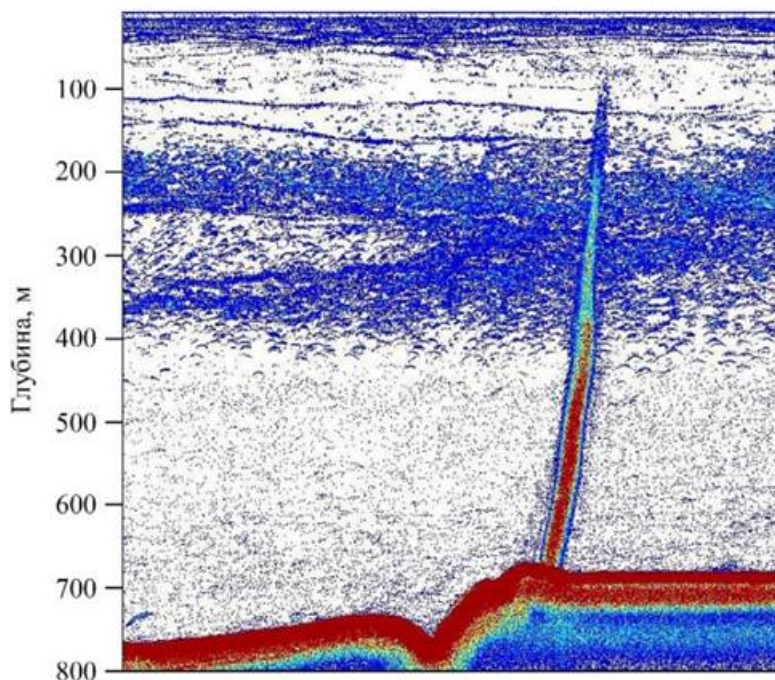


Рис. 3. Результат отображения данных эхолота [\[18\]](#).

Следующий метод выявления выбросов метана – дистанционное зондирование, которое может применяться для определения сейсмических аномалий. В 2024 г. группа ученых впервые применила этот метод с помощью Robust Satellite Technique (RST) [\[27\]](#). Эта технология позволила им изучить данные о выбросах CH_4 , полученные с помощью атмосферного инфракрасного зонда, а затем применить их к землетрясению в Турции и Сирии 2023 года.

Данные о выбросах метана были получены с помощью гиперспектрального датчика, который установлен на одном из искусственных спутников Земли. Датчик имеет 2378 спектральных каналов и способен сканировать всю планету дважды в день. На основе полученных данных была разработана трехмерная структура аномальных выбросов метана, однако ученые отмечают, что миграция воздушных масс и атмосферная циркуляция вносят серьезные коррективы в результаты исследования [\[28, 29\]](#). При необходимости изучить выбросы метана в конкретном регионе могут наблюдаться временные [\[30\]](#) и региональные неточности. Однако метод дистанционного зондирования с помощью спутника был впервые опробован для установления механизмов выбросов метана, что уже является важным шагом для научного сообщества.

Заключение

В ходе исследования выявлены основные факторы, влияющие на интенсивность выбросов метана при поверхностном замерзании почвы или водной поверхности во время осенне-зимнего периода: температура, содержание органических веществ, уровень воды, тип среды, состояние микробиоты, толщина льда и уровень осадков. Показано, что низкие температуры замедляют метаногенез, а высокие – ускоряют и способствуют выбросу газа. Установлено, что факторы, влияющие на метаногенез как в почве, так и в водоемах, имеют схожее происхождение, что обусловлено их нахождением в единой экосистеме. Исследование позволило разработать методы контроля и управления метановыми выбросами при сезонном похолодании. Показана эффективность использования современного программного комплекса Solidworks для моделирования процессов метаногенеза, а также применения акустического метода и

дистанционного зондирования для определения выбросов метана.

Основным итогом данного исследования является визуализация механизма метановых выбросов при замерзании, с демонстрацией сути выбросов большого количества CH_4 , на основе данных о температуре, толщине льда, осадках, микробном содержании воды или почвы. Систематизация и анализ данных о влиянии набора этих факторов способствует глубокому пониманию механизма выброса метана в каждой конкретной экосистеме.

Полученные результаты имеют важное значение для разработки стратегий мониторинга и управления климатическими рисками, включая как стратегию уменьшения последствий (митигации), так и стратегию адаптации к новым условиям. Исследование доказывает необходимость дальнейшего изучения механизмов выбросов метана для эффективного решения глобальных экологических и климатических проблем.

Научная новизна данного исследования заключается в том, что в нем разрабатываются механизмы выброса метана при изменении температуры осенью с разных поверхностей: с поверхности водоемов и с поверхности почвы, а также в статье предложены методы по контролю данного механизма и управлению метановыми выбросами при сезонном похолодании.

Библиография

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Электронный ресурс. URL: <https://www.ipcc.ch/> (дата обращения: 23.07.2024).
2. Synthesis Report AR6. Climate Change 2023 // Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Электронный ресурс. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/resources/spm-headline-statements> (дата обращения: 23.07.2024).
3. Yang M. H., Ya T. D., Hirose N., Hideyuki F. Daily freeze-thaw cycle of the surface soil layer on the Qinghai-Tibet Plateau // Chinese Science Bulletin. 2006. № 51. С. 1974-1976.
4. Никитина Е. Н. Изменение климата в Арктике: адаптация в ответ на новые вызовы // Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право. 2019. № 5. С. 177-200. DOI: 10.23932/2542-0240-2019-12-5-177-200 EDN: OISKHG.
5. Влад И. В., Шароватов А. А. Вопросы предотвращения последствий глобального изменения климата в Арктике // Инновации и инвестиции. 2023. № 1. EDN: LFVAWK.
6. Папцова И. И., Каманин В. М. Воздействие изменения климата на арктические экосистемы и оценки эмиссии парниковых газов при использовании морских судов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. № S1. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-252-254 EDN: WDGCWV.
7. Sauer S., Hong W.-L., Yao H., Lepland A., Klug M., Eichinger F., Himmler T., Crémière A., Panieri G., Schubert C. J., Knies J. Methane transport and sources in an Arctic deep-water cold seep offshore NW Svalbard (Vestnesa Ridge, 79°N) // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2021. V. 167. P. 103430. DOI: 10.1016/j.dsr.2020.103430. EDN: PRCHSU.
8. Бодански Д. Интервенции в области изменения климата Арктики // Международный журнал морского и прибрежного права. 2020. № 35(3). С. 596-617.
9. Methane, explained. National Geographic. Электронный ресурс. URL: <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/methane/> (дата обращения: 23.01.2025).
10. Office of Air and Radiation, US EPA (October 7, 1999). U.S. Methane Emissions 1990-2020: Inventories, Projections, and Opportunities for Reductions (EPA 430-R-99-013). URL: <https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2013/07/EPA-Methane-Emissions->

1990-2020.pdf (дата обращения: 04.02.2025).

11. Руководство пользователя по оценке выбросов углекислого газа, метана и закиси азота в сельском хозяйстве с использованием инструмента государственного кадастра (PDF). URL: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-](https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-12/documents/ag_module_users_guide.pdf)

12/documents/ag_module_users_guide.pdf (дата обращения: 11.02.2025).

12. Buhaug H., von Uexkull N. Vicious Circles: Violence, Vulnerability, and Climate Change // *Annual Review of Environment and Resources*. 2021. № 46. DOI: 10.1146/annurev-environ-012220-014708. EDN: QDQOJM.

13. Sorensen P. O., Finzi A. C., Giasson M.-A., Reinmann A. B., Sanders-DeMott R., Templer P. H. Winter soil freeze-thaw cycles lead to reductions in soil microbial biomass and activity not compensated for by soil warming // *Soil Biology and Biochemistry*. 2018. № 116. С. 39-47. DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.09.026.

14. Mastepanov M., Sigsgaard C., Dlugokencky E., Houweling S., Ström L., Tamstorf M., Christensen T. R. Large tundra methane burst during onset of freezing // *Nature*. 2009. № 456. С. 628-630. DOI: 10.1038/nature07464. EDN: MLZBOB.

15. Arndt K., Oechel W., Goodrich J., Bailey B., Kalhori A., Hashemi J., Sweeney C., Zona D. Increased methane emissions due to later soil freezing in Arctic tundra ecosystems. 2019.

16. Ли Ч., Брушков А., Чеверев В., Соколов А., Ли К. Эмиссия метана и углекислого газа при замерзании почвы без вечной мерзлоты // *Энергии*. 2022. № 15. С. 2693. DOI: 10.3390/en15072693.

17. Ragg R., Peeters F., Ingwersen J., Teiber-Sießegger P., Hofmann H. Interannual Variability of Methane Storage and Emission During Autumn Overturn in a Small Lake // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021. № 126. DOI: 10.1029/2021JG006388. EDN: CEEHFB.

18. Скверавски А. Сезонная и годовая изменчивость выбросов метана в атмосферу с поверхности эвтрофного озера, расположенного в умеренной зоне (озеро Кортковское, Польша). 2024. DOI: 10.5194/egusphere-2024-1786.

19. Kuttim M., Hofsommer M. L., Robroek B. J. M., Signarbieux C., Jassey V. E. J., Laine A. M. Freeze-thaw cycles simultaneously reduce carbon uptake by peatland photosynthesis and ecosystem respiration // *Boreal Environ.* 2017. № 22. С. 267-276. EDN: YFSEUZ.

20. Tokida T., Mizoguchi M., Miyazaki T., Kagemoto A., Nagata O., Hatano R. Episodic methane ejection from peatlands during spring thaw // *Chemosphere*. 2007. № 70. С. 165-171. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.06.042. EDN: LZXYJR.

21. Mikhailov-Fletcher S., Tans P., Brachwiler L., Miller J., Neumann M. CH₄ sources estimated from atmospheric CH₄ observations and its C-13/C-12 isotope ratios: 1. Inverse modeling of source processes // *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. Vol. 18. № 18.

22. Официальный сайт Solidworks. Электронный ресурс. URL: <https://www.solidworks.com/> (дата обращения: 11.02.2025).

23. Черных Д., Саломатин А., Юсупов В., Шахова Н., Космач Д., Дударев О., Гершелис Е., Силионов В., Ананьев Р., Семилетов И. Акустические исследования глубоководных газовых факлов Охотского моря // *Вестник Томского политехнического университета "Инжиниринг геологических активов"*. 2021. № 332. С. 57-68. DOI: 18799/24131830/2021/10/3286.

24. Лейфер И., Черных Д., Шахова Н., Семилетов И. Оценка потока газа гидролокатором с помощью пузырьковой инсонификации: применение к потоку пузырьков метана из областей просачивания во внешнем море Лаптевых // *Криосфера*. 2017. Т. 11. № 3. С. 1333-1350.

25. Макаров М., Муякшин С., Кучер К., Асламов И., Гранин Н. Исследование газового сипа Исток на Селенгинском мелководье активными акустическими, пассивными акустическими и оптическими методами // *Журнал исследований Великих озер*. 2020. Т.

46. С. 95-101.

26. Veloso M., Greinert J., Mienert J., De Batist M. A new methodology for quantifying bubble flow rates in deep water using split-beam echosounders: Examples from the Arctic offshore NW-Svalbard // Limnology and Oceanography-Methods. 2015. V. 13. № 6. С. 267-287. DOI: 10.1002/lom3.10024. EDN: UONQKV.

27. Huang Y., Cui J., Zhima Z., Jiang D., Wang X., Wang L. Construction of a Fine Extraction Process for Seismic Methane Anomalies Based on Remote Sensing: The Case of the 6 February 2023, Türkiye-Syria Earthquake // Remote Sensing. 2024. № 16. С. 29-36. DOI: 10.3390/rs16162936. EDN: SBPIWR.

28. Eshkuvatov H., Ahmedov B., Shah M., Begmatova D., Jamjareegulgarn P., Melgarejo-Morales A. Exploring Electromagnetic Wave Propagation Through the Ionosphere Over Seismic Active Zones // Pure Application Geophysics. 2024. № 1-15.

29. Myrvoll-Nilsen E., Sørbye S. H., Fredriksen H. B., Rue H., Rypdal M. Statistical estimation of global surface temperature response to forcing under the assumption of temporal scaling // Earth System Dynamics. 2020. V. 11. № 2. С. 329-345. DOI: 10.5194/esd-11-329-2020. EDN: OAXWBE.

30. Von Uexkull N., Buhaug H. Security implications of climate change: A decade of scientific progress // Journal of Peace Research. 2021. № 58(1). С. 3-17. DOI: 10.1177/0022343320984210. EDN: ZVWXNW.

31. Yang Zao, Zhu Dan, Liu Liangfeng, Liu Xinwei, Chen Huai. The Effects of Freeze-Thaw Cycles on Methane Emissions From Peat Soils of a High-Altitude Peatland // Frontiers in Earth Science. 2022. № 10. DOI: 10.3389/feart.2022.850220. EDN: MUAYOF. ""

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Предметом исследования является изучение механизмов выброса метана при замерзании водоемов и поверхности почв в осенне-зимний период.

В связи с этим, предлагаем добавить в название статьи словосочетание «водоемов и поверхности почв». Название статьи может быть: «Механизмы выброса метана при замерзании водоемов и поверхности почв в осенне-зимний период».

Тема исследований актуальна. Как отмечает автор, исследование механизма выбросов метана в период замерзания осенью важно не только с точки зрения экологии и экосистемы, но и для того, чтобы разработать адекватные меры мониторинга профилактики и управления климатическими рисками. Метан является одним из катализаторов парникового эффекта. Метан имеет глобальный парниковый потенциал, который в среднем в 28–34 раза превышает показатели углекислого газа. Водоемы, особенно в северных широтах, являются существенными источниками эмиссии и выброса метана. В связи с этим, актуальным является изучение факторов, влияющих на интенсивность выбросов этого парникового газа, изучение физико-химических процессов, происходящих в период замерзания водоемов и поверхности почв осенью, оценка влияния температуры и других условий на выделение метана.

Методология исследования основана на применении методов обзора литературных источников, сравнительного метода, метода визуализации и синтеза научных данных.

Научная новизна исследований в статье не представлена. Однако автор утверждает, что «проблемой данного исследования является то, что полностью механизмы выброса метана при замерзании не до конца изучены». Поэтому, следует предполагать, что данные исследования могут иметь элементы новизны.

Стиль статьи – научный. Объем статьи выдержан. Структура статьи не соответствует требованиям журнала. К сожалению, в статье не представлены результаты собственных исследований автора. В тексте статьи имеются неточности и опечатки. Например в абзаце «Одним из катализаторов парникового эффекта является метан (CH₄), который в том числе из естественных экосистем, таких как водоемы и почвы», видимо, пропущены слово и союз: «который...выделяется...в том числе.. и... из естественных экосистем».

Считаем, что в русскоязычной статье цитирование источников должно быть представлено только на русском языке, чтобы соблюдался единый языковой стиль. В тексте автор приводит цитату из 2-го источника на английском языке: «All global modelled pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot, and those that limit warming to 2°C (>67%), involve rapid and deep and, in most cases, immediate greenhouse gas emissions reductions in all sectors this decade. Global net zero CO₂ emissions are reached for these pathway categories, in the early 2050s and around the early 2070s, respectively. (high confidence)». Желательно было бы представить русский перевод данной информации.

Библиография статьи очень объемная, включает 31 литературный источник. Все они исключительно на иностранном языке. Российскими учеными данная проблема также изучается, поэтому целесообразно было бы сослаться и на их результаты исследований. Выводы в статье не конкретизированы, имеют обобщенный характер. Не допустимо ссылаться в выводах на рисунки в статье: «Основным итогом данного исследования является визуализация механизма метановых выбросов при замерзании, представленная на рис. 1. Данный рисунок отражает суть выбросов большого количества CH₄ из-за рассмотренных выше факторов...».

Последний абзац заключения: «В исследовании подчеркивается, что в качестве примера учеными было взято сильное землетрясение, однако сам метод, представленный в этом исследовании, может быть использован для дистанционного сейсмического мониторинга...» не имеет отношения к теме исследования.

Заключение статьи необходимо доработать.

Данная статья может быть опубликована в журнале «Арктика и Антарктика» только после доработки.

Результаты процедуры повторного 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, изучение механизмов выброса CH₄ при замерзании поверхности водоемов и поверхности почв с определением факторов, влияющих на интенсивность выбросов CH₄, изучением физико-химических процессов, происходящих в период замерзания, оценкой влияния температуры и других условий на выделение CH₄.

Методология исследования, исходя из анализа статьи можно сделать вывод о том, что автором статьи использовался метод анализа литературных источников, метод обобщения и конспектирования, составление реферативного литературного обзора.

Актуальность затронутой темы безусловна и состоит в получении информации о эмиссии метана CH₄ в атмосферу, что увеличивает риск всех опасностей и негативных последствий для жизни на Земле при изучении всех возможных смоделированных ситуациях

Научная новизна заключается в попытке автора использовать анализ методов

исследования содержания метана для решения глобальных экологических и климатических проблем.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим механизм выброса метана при поверхностном замерзании водоема, разработанный автором, хотя, на наш взгляд, схема мало информативна, обща, не обладает новизной. Рис. 3. Результат отображения данных эхолота [18] и Рис. 2. Показатели воздействия на окружающую среду в программе Solidworks (источник — сайт Solidworks) заимствованы.

Примененный автором метод литературного обзора не полон, не содержит ссылок на нормативно-правые источники. Автору статьи следовало бы выделить разделы статьи обсуждение результатов и выводы для лучшего восприятия, указав целевую установку, задачи.

Не совсем относится к предмету исследования автора приводимый автором статьи Сводный отчете МГЭИК, где отмечается, что причина глобального потепления на 1,1°C в 2011–2020 гг. в сравнении с периодом 1850–1900 гг. стала хозяйственная деятельность человека [2]. существующие точки зрения на причины изменения погодноклиматических условий указывают и на действие естественных факторов среды. При этом сам автор констатирует «Одним из катализаторов парникового эффекта является метан (CH₄), который выделяется в том числе из естественных экосистем, таких как водоемы и почвы». Следует отметить использование понятие катализатор в данном контексте неуместен В связи с тем, что метан являясь парниковым газом осуществляет непосредственное воздействие на изменение отражающей способности атмосферы, поглощая длинную новую радиацию.

Статьи констатируются, что в статье приводится «...программы для оценки воздействия на окружающую среду, для проведения термического анализа, а также для трехмерного моделирования проектов и картографических исследований». На самом деле это не так. Библиография не исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, не содержит ссылки на нормативно-правовые акты.

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

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

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Хименков А.Н., Станиловская Ю.В. Воронки газового выброса как объект геокриологии (Часть 1) // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.73816 EDN: RTLODK URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=73816

Воронки газового выброса как объект геокриологии (Часть 1)

Хименков Александр Николаевич

кандидат геолого-минералогических наук

ведущий научный сотрудник, Институт геозологии РАН

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

✉ a_khimenkov@mail.ru



Станиловская Юлия Викторовна

Специалист по взаимодействию инфраструктуры и мёрзлых пород, Тоталь

101000, Россия, г. Москва, ул. Лесная, 7

✉ e-mailjulia.stanilovskaya@total.com



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

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.2.73816

EDN:

RTLODK

Дата направления статьи в редакцию:

24-03-2025

Аннотация: Данная публикация является первой частью статьи, в которой, на основании анализа имеющихся в научной литературе данных, показана значительная роль криогенного фактора, на подготовку пневматических взрывов в толще многолетнемёрзлых пород. Объектом исследования является локальные криогенные газодинамические геосистемы, развитие которых приводит к пневматическому взрыву и формированию воронок газового выброса. Предметом исследования являются морфология и строение криогенных образований в мёрзлых породах, слагающих воронки газового выброса, обнаруженных на севере Западной Сибири. Авторы

подробно рассматривают такие аспекты темы, как анализ и обобщение данных по криогенному строению различных элементов воронок газового выброса. Особое внимание уделено изучению различного рода деформаций первичных ледяных образований, что позволяют проследить историю возникновения и развития локальных газодинамических геосистем в толще многолетнемёрзлых пород. Авторы не рассматривают вопросы, связанные с генезисом газа, поскольку считают, что напорные процессы, происходящие в локальных газонасыщенных зонах с повышенным давлением, не зависят от его происхождения. Основным методом, используемым в данной статье, является анализ материалов научных публикаций по рассматриваемой теме, а также данных лабораторного моделирования проведённого авторами. Синтез анализируемых материалов осуществлялся на базе геосистемного подхода. Особым вкладом авторов в исследовании темы является выявление общей закономерности в строении воронок газового выброса. Все воронки, не заполненные водой и доступные к изучению, имеют трёхчленное строение. В нижней части воронок наблюдается расширение, иногда за счёт каверн и гротов. В средней части поперечное сечение воронок уменьшается, стенки кратера, чаще всего, отвесные ровные. В верхней части наблюдается расширение, в форме раструба. Новизна исследования заключается в нахождении парагенетических связей между морфологическим строением воронок, стадиями развития газодинамической геосистемы, подготавливающей условия для пневматических взрывов и комплексами процессов на каждой стадии. К основным выводам проведённого исследования следует отнести выявление ведущей роли давления газа на трансформацию криогенного строения мёрзлых пород на всех стадиях.

Ключевые слова:

многолетнемёрзлые грунты, пластические деформации, разрывные деформации, сдвиговые деформации, фильтрация газа, газовые флюиды, флюидогеодинамика, ледогрунтовые газонасыщенные геосистемы, стадии развития, парагенетические связи

Работа выполнена в рамках государственного задания: № 1022061500209-6-151 FMWM-2025-0003 № 122022400105-9 по теме «Природа и техногенез: геоэкологические проблемы и адаптационные технологии их решения».

Введение

В 2014 году в районе Бованенковского газоконденсатного месторождения на Ямале было зафиксировано необычное образование, получившее название Ямальский кратер. Оно представляло собой глубокую ворону окружённую валом выброшенного грунта. К началу 2025 г количество обнаруженных подобных объектов, с близкой морфологией, увеличилось и приближается к 20. Все они расположены на севере Западной Сибири вблизи или на территориях газовых и нефтяных месторождений. За прошедшие годы были опубликованы десятки научных статей, в которых высказываются различные точки зрения на формирование данных объектов. По мнению наиболее авторитетных исследователей, занимавшихся проблемой происхождения данных образований [\[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\]](#), все они обязаны своим происхождением выбросу подземного газа. Исходя из строения, указывающего на взрывной характер процессов, они получили название воронки газового выброса. В рамках принятых в геокриологии представлений формирование криогенных явлений (формы рельефа, морфология криогенных образований), обуславливаются криогенными процессами [\[11\]](#). В настоящее время в

парадигму геокриологии понятие воронки газового выброса не входит и является термином свободного пользования. Природные, в том числе и криогенные явления, а также связанные с ними процессы и формы рельефа являются лишь внешними признаками, отражающими локальные изменения геологической среды. Для формирования устойчивых структур, фиксируемых на поверхности, в грунтовом массиве должны произойти значительные изменения. На локальном уровне формируются обособленная система массообменных процессов, которая обуславливает возникновение новых структур, определённой морфологии, появляются границы, отделяющие локальный объект от вмещающих грунтовых массивов. Эти изменения сопровождаются сменяющимися комплексами парагенетически связанных криогенных процессов и соответствующих им криогенных образований. Все это свидетельствует о возникновении и формировании локальной криогенной геосистемы [\[12\]](#). Её развитие, в конечном итоге, выражается во внешних формах, определяемых как мерзлотное явление. Точно также формирование воронок газового выброса является конечным результатом развития локальной газодинамической криогенной геосистемы. Проследив развитие данной геосистемы, от её возникновения до разрушения, можно будет выявить закономерности развития и распространения пневматических взрывных процессов в криолитозоне, разработать методы поиска газонасыщенных зон в верхних горизонтах многолетнемёрзлых пород, получить новые знания в области газодинамических криогенных геосистем. Решение данных вопросов затруднено слабой изученностью криогенного строения данных объектов. Это связано с рядом объективных и субъективных причин, главной из которых является их кратковременное существование. Воронки газового выброса быстро, уже в течение первого летнего сезона, заполняются водой и разрушаются. Данные объекты располагаются в отдалённых местах, поэтому посещение объектов и доставка оборудования для исследований затруднена. Проведение исследований непосредственно в воронке представляет опасность. Вследствие этого изучение криогенного строения мерзлых грунтов, в которых сформированы воронки, можно проводить только на основании отрывочных и разрозненных фото и видео материалов. Значительные трудности создаёт отсутствие теории газодинамических процессов в мёрзлых породах. Всё это объясняет отсутствие, за редким исключением [\[8, 9\]](#), интереса геокриологов к выявлению условий подготовки пневматического выброса газа, посредством изучения криогенных образований в различных структурных элементах воронок. Специалисты из других областей знания о Земле их вообще не рассматривают.

Основное внимание исследователей уделяется двум основным темам: происхождению газа участвующего в формировании воронок (поступление с нижележащих горизонтов, криогенная концентрация биохимического газа при промерзании субаквальных осадков, разложение газогидратов); непосредственно выбросу (морфология воронок, мощность взрыва, дальность разлёта обломков и др.).

Но эти темы непосредственно не связаны с геокриологией. В связи с этим возникает вопрос, можно ли отнести воронки газового выброса образования к криогенным явлениям? А также являются ли процессы, приводящие к их формированию криогенными? Данные вопросы отпадают, если рассматривать процессы, происходящие между стадией накопления газа в локальных зонах с аномально высоким пластовым давлением и стадией взрыва. То есть процессы, происходящие на этапе подготовки пневматического выброса. По имеющимся данным, этот период насчитывает от нескольких лет до многих десятков лет. За это время в локальном объёме массива мёрзлых пород, расположенном непосредственно над газонасыщенной зоной, происходит коренная перестройка первичного криогенного строения, и формирование

новых криогенных образований. Все эти изменения происходят в поле воздействия больших неравномерных давлений и высокого содержания газа. Общность факторов влияющих на внутригрунтовые процессы, обуславливает формирование закономерно организованных комплексов парагенетических криогенных образований. В этом случае анализ структурных и текстурных особенностей криогенного строения является основным источником информации о процессах, подготавливающих условия для реализации пневматического выброса.

В предлагаемой статье авторами основное внимание уделено изучению криогенных образований, соответствующих определённым стадиям развития локальных криогенных газодинамических геосистем. Вопросы, связанные с генезисом внутригрунтового газа и его транспортировкой к зоне накопления (газонасыщенной зоне с повышенным давлением), не рассматриваются.

Основным исходным материалом являются видео и фото изображения криогенных образований, сделанных в воронках газового выброса, обнаруженных к настоящему времени, и представленных в научных публикациях различных изданий.

Вследствие слабой разработанности рассматриваемой темы, и незначительного объёма исходных фактических материалов был использован метод аналогий с привлечением материалов из различных областей наук о Земле, строительства, инженерной геологии и др.

Морфология воронок газового выброса

Прежде чем перейти к изучению материалов по криогенному строению воронок газового выброса рассмотрим общие, выявленные в ходе полевых исследований, особенности их строения. Практически все воронки, доступные для изучения, имеют трёхчленное строение (рис. 1). В нижней части воронок наблюдается расширение, или в виде сплошной полости, или серии каверн и гротов. В средней части поперечное сечение воронок уменьшается. Вертикальные размеры сужающихся частей меняются от десятков метров (рис. 2) до нескольких сантиметров (рис. 3). Выше сужающейся части воронки наблюдается расширение, в форме усечённого перевёрнутого конуса (раструба). Вокруг воронки, как правило, располагается вал кольцевой формы, состоящий из выброшенных из воронки пород. Пневматическому выбросу и образованию воронок, предшествует формирование бугров, возраст которых насчитывает от нескольких до десятков лет.

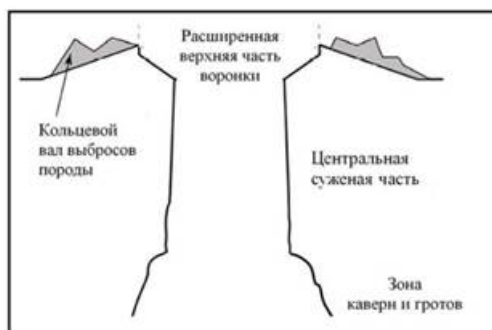


Рис. 1. Обобщённая схема строения воронок газового выброса

Отмеченная закономерность морфологии воронок газового выброса не случайна, она связана с общей закономерностью развития криогенной локальной газодинамической геосистемы при подготовке взрывного процесса в массиве мёрзлых грунтов.

1. На начальном этапе формируется локальная зона накопления внутригрунтового газа с

аномально высоким давлением. Как уже отмечалось в данной статье происхождение газа и процессы его перераспределения не рассматриваются. Этой теме посвящены наши ранее опубликованные работы [13]. Размеры газонасыщенной зоны, как будет показано в статье, превосходят размеры будущей воронки газового выброса.

2. Давление газа оказывает давление на перекрывающие породы и приводит к их деформациям. Если скорость нарастания давления небольшая, а перекрывающие зоны повышенных давлений представлены пластичными грунтами льдистыми глинами и суглинками, то над зоной повышенного пластового давления формируется область сдвиговых и пластических деформаций. Данная область соответствует наибольшим напряжениям, соответствующим центральной части газонасыщенной зоны, поэтому её поперечные размеры меньше чем область первоначального накопления газа.

3. После того как давление превысит предел прочности кровли, происходит ее выброс. Зона выброса превосходит размеры сужающейся части. При повышении внутригрунтового давления до критического формируется зона растяжения и разрыва сплошности мерзлой кровли. В этом случае формируется зона растягивающих напряжений конусообразной формы (часть 3). При этом выбрасываются фрагменты грунта, залегающие, как над газонасыщенной зоной, так на прилегающего к воронке участке.

Несмотря на морфологическую общность воронок газового выброса, соотношение отдельных структурных элементов может значительно отличаться. Это связано с различным соотношением процессов, предшествующих газовым выбросам. В случае формирования вытянутой цилиндрической формы стенок сужающейся части, подготовка пневматического взрыва будет длительной, достаточной для развития пластических деформаций и движения мёрзлого грунта без разрыва сплошности массива. Наибольшие размеры данной области зафиксированы в Ямальском кратере, здесь они составляют более 20 м по высоте и около 15 м в диаметре [14] (рис. 2). В случае быстрого возрастания давления, когда пластические деформации не успевают компенсировать возникающие нагрузки, быстро развиваются разрывные деформации. В этом случае суживающаяся часть будет незначительной, иногда вообще принимая форму клина. В воронке обнаруженной А. Б. Осокиным в 2014 году на полуострове Ямал (точного местоположения не указано) над зоной повышенного давления наблюдается зона сужения клиновидной формы (рис.3). Верхний и нижний расширенные участки в данном случае смыкаются. На рисунках представлены два крайних варианта морфологии структурных элементов воронок газового выброса.



Рис. 2. Принципиальная схема строения Ямальского кратера

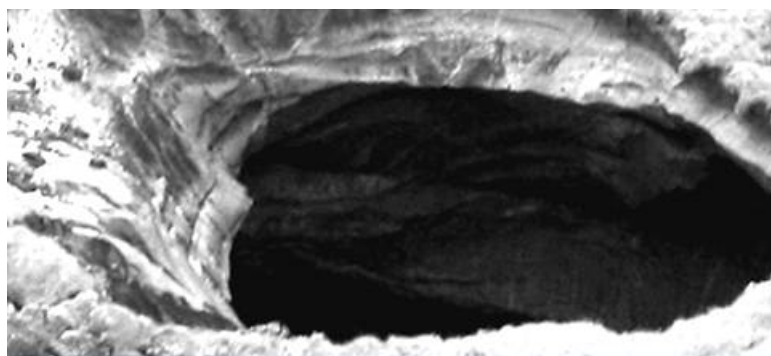
1 – вода озера на дне кратера [\[14\]](#)

Рис. 3. Воронка обнаруженная А. Б. Осокиным на Ямале 26 июля 2013

Фото А. Б. Осокина

В большинстве обследованных воронок строение стенок близко к 1 типу.

Криогенное строение нижней расширенной части воронки газового выброса

Во всех воронках, где нижние расширенные части не затоплены, фиксируются следы мощных динамических процессов. В сентябре 2013 года в 90 км от Антипаюты (Антипаютинская воронка), Тазовского района Ямала-Ненецкого автономного округа. Была обнаружена воронка газового выброса радиусом 15м, глубиной около 15м. Вертикальные стенки, воронки сложены льдом. В нижней расширенной части Антипаютинской воронки (рис. 4) прослеживаются многочисленные деформации пластового льда. Деформации и нарушения в нижней расширенной части Антипаютинской воронки свидетельствуют о мощных локальных давлениях. Местами массив пластового льда разорван на отдельные блоки, лед в них разбит трещинами и смят в складки. Видны следы течения льда, обтекающие ледогрунтовые блоки. Местами слои смяты образуя своеобразные «рулеты».



Рис. 4. Антипаютинская воронка. В расширенной нижней части пластические

деформации и течение ледогрунта Фото М. Лапсуя

Деформации и нарушения в нижней части зоны каверн и гротов Антипаютинской воронки свидетельствуют о мощных локальных давлениях, направленных как снизу вверх, так и в боковом направлении.

В обнаруженной в 2020 г на полуострове Ямал воронке [\[15\]](#) в расширенной нижней части

также отмечаются значительные деформации (рис. 5). Изогнутые ленты льда, пережатия и разрывы слоёв, обтекание ледогрунтовых блоков слоистым ледогрунтом, всё это свидетельствует о значительных внутригрунтовых давлениях. Это подтверждает и строение перекрывающих отложений. Первичные сетчатые криотекстуры в перекрывающем горизонте морских отложений полностью разрушены.

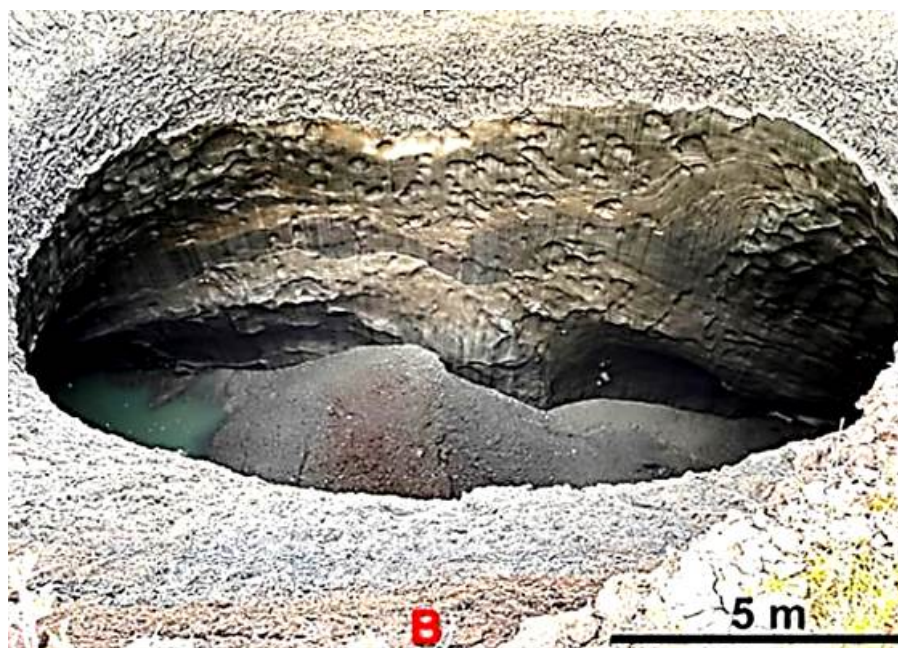


Рис. 5. Деформации в расширенной нижней части воронки газового

выброса, обнаруженной в 2020 г. на Ямале. Фото В.И. Богоявленского [\[15\]](#).

Рассмотренные материалы указывают на то, что грунты нижней части кратеров ВГВ в период их деформации находились в мёрзлом состоянии. Кроме того силовое воздействие оказывалось на них длительное время и не связано с кратковременным ударным напряжением возникшим при взрывном выбросе газа.

В Ямальском кратере к моменту начала изучения нижняя расширенная часть оказалась затопленной. Но и в перекрывающих слоях следы значительных давлений и соответствующих им деформаций также прослеживаются. Для расширенной части характерно наличие локальных углублений в стенках. Здесь обнаружена серия гротов и каверн. На момент обнаружения в июле 2014 г. они представляли собой скопления округлых углублений в нижней части стенки кратера размером от 20–30 см до 2–3 м, разделённые ледогрунтовыми перегородками (рис. 6). Уже к концу лета 2014 г. вследствие вытаивания перегородок мелкие гроты слились и образовали обширные полости (гроты).



Рис. 6. Фрагменты зоны небольших пустот, вытаивание и слияние которых в будущем формирует крупные гроты на дне Ямальской воронки (июль 2014 г)

Фото М. О. Лейбман

Газовая составляющая криогенного строения

Гроты нижней расширенной части Ямальского кратера, являются верхней частью газонасыщенной зоны с аномально высоким давлением газа. Подтверждением этого может служить особенность криогенного строения стенок гротов. Для них характерны вытянутые длинные и узкие светлые ленты насыщенные газом, хорошо выделяющиеся на темном фоне чистого прозрачного льда (рис. 7). Ленты выходят из нижней части грота изгибаются, ветвятся, огибают округлые газовые скопления. В верхней части грота на контакте с вертикальными стенками, формирующими суженную часть кратера, ленты стыкуются с ячеистыми структурами характерными для вышерасположенной сужающейся части воронки (рис. 8)



Рис. 7. Газовые флюиды в стенках грота в нижней части Ямальского кратера, ноябрь 2014. (фото В.А. Пушкарёва)



Рис. 8. Связь «газовых лент» грота с ячеистыми образованиями на вертикальных стенках суженной части Ямальского кратера

ноябрь 2014 (фото В.А. Пушкарёва)

Следует отметить, что на всех фотографиях видно, что потоки газа устремлены к стенкам сужающейся части кратера извне. То есть газонасыщенная зона, залегающая под кратером по размерам гораздо больше, чем размеры самого кратера. Газ выдавливается в область меньших давлений, в зону транзита, по которой он поднимается к поверхности.

Общепринято утверждение, что газ не может фильтроваться сквозь лёд или льдонасыщенный мёрзлый грунт. Наши лабораторные исследования показали, что оно справедливо только в том случае если льды и ледогрунты не деформированы. При воздействии нагрузок и возникновении деформаций эти среды становятся газопроницаемы. Нами были проведены исследования по напорному воздействию газа на лёд. Давлении газа составляло около 4 кг/см^2 , при температуре льда около $-0,5^\circ\text{C}$. Газ подавался в основание ледяного образца через штуцер диаметром 1 см. Воздействие газа на лёд, при данных показателях, вызвала его деформацию и формирование газонасыщенных зон различной морфологии, в виде белых изгибающихся лент и белых столбообразных образований приуроченных к штуцеру подачи газа (рис. 9). Границы газонасыщенных зон с вмещающим массивом льда резкие, с многочисленными трещинами и пластическими деформациями [\[16\]](#).



Рис. 9. Над штуцером подачи газа, во льду формируются два вида газонасыщенных зон, один в виде изгибающихся лент, другой в виде столба белого газонасыщенного льда.

Фотография П. Соболева

Проведённые эксперименты показывают, что для того чтобы сквозь лёд или льдонасыщенные грунты начал фильтроваться газ, не нужны обязательно высокие давления. Наиболее благоприятными условиями являются те, при которых мёрзлые породы находятся при температурах, близких к значениям фазовых переходов. В этом случае прочность мёрзлых грунтов и льдов резко снижается. Достаточно небольших давлений, чтобы в них возникали деформации и создавались условия для интенсивной фильтрации газа. К сожалению, данная тема в геокриологии слабо разработана, эту тему имеются лишь единичные публикации [16, 17, 18], хотя её теоретическое и практическое значение, достаточно велико, и со временем только оно только возрастает. Это обусловлено добычей углеводородов в Арктических регионах РФ и проблемой поступления в атмосферу парниковых газов из многолетнемёрзлых пород.

Криогенное строение средней (сужающейся) части

воронки газового выброса

В средней, суживающей части воронки газового выброса, в стенках кратеров, широко распространены деформированные криогенные образования, морфология которых указывает на значительные напряжения, возникавшие в мёрзлых грунтах. Для данной части воронок характерны следующие структуры: парагенезы криогенных образований обусловленных пластическими и разрывными деформациями, кольцевые структуры, сотовые льды.

Наименее выражена сужающаяся часть в воронке газового выброса обнаруженной А. Осокиным (рис. 3). Здесь она представлена клиновидным выступом, разделяющим нижнюю и верхнюю расширенные части. Во льду наблюдаются многочисленные сколы, разрывы и пластические деформации.

В Ямальском кратере грунтовая толща, слагающая цилиндрическую, сужающуюся часть, пронизана различного рода локальными пластическими и разрывными деформациями. Шлиры в виде изгибающихся разнонаправленных ледяных лент распространены по всей поверхности. На рис. 10 показаны деформации первичной слоистости и первичного криогенного строения над гротом. Здесь первичная слоистость образует куполообразную, облегающую поверхность грота структуру, в которой наблюдаются многочисленные пластические и разрывные деформации. Крупный ледяной слой в левой части фотографии запрокинут и залегает согласно деформированной слоистости грунтового массива. Лед под действием в шлере выдавлен и частично перераспределен в секущую трещину. Пластические и разрывные деформации мёрзлых пород и ледяных шлиров показывают, что они происходили в мерзлом состоянии.



Рис. 10. Деформация первичной слоистости над зоной каверн и гротов.

Фото В.В. Оленченко

Наиболее вероятной причиной деформирования слоистости над гротами логично связать с воздействием внутригрунтового газа, находящегося под высоким давлением. Над многочисленными кавернами, образуемыми газовыми полостями виды изгибания грунтовых слоёв и ледяных шлиров (рис. 11, 12), что свидетельствует о напорном воздействии газа на вмещающие мёрзлые грунты.



Рис. 11. Пластические и разрывные деформации в мерзлых породах в средней части

Ямальной воронки газового выброса июль 2014 (Фото В.И. Богоявленского) [\[19\]](#).

На отдельных участках наблюдается обтекание слоистым ледогрунтом изометричных блоков газонасыщенного льда (рис. 12). На контакте с данными блоками единый поток ледогрунта разделяется на отдельные, обтекающие их фрагменты, обтекающие их. При этом мерзлый массив в целом не разрушился на отдельные блоки и сохранил свою целостность.

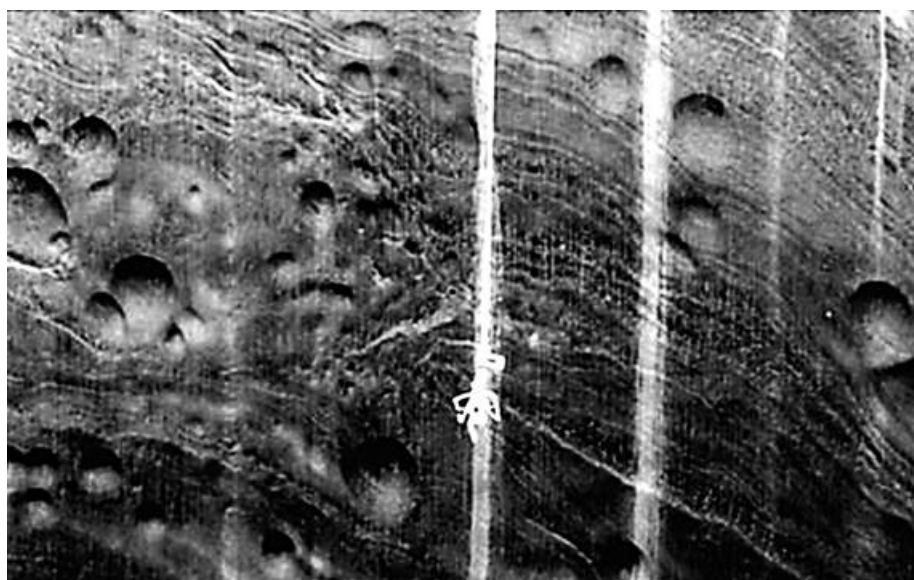


Рис. 12. Обтекание изометричных блоков газонасыщенного льда слоистым ледогрунтом.

Ямальный кратер. Июль 2014 г. Фото В.В. Оленченко

Верхняя часть суживающейся части воронок газового выброса наиболее подвержена взрывному воздействию, поэтому встречаются в виде отдельных фрагментов только в

Ямальском кратере. Здесь при первичном обследовании в июле 2014 г. [3], обнаружены фрагменты куполовидного свода, в виде плоских наклонённых к центру поверхностей, нависающих над вертикальным стволом кратера (рис. 13). Ровная поверхность фрагментов свода усеяна многочисленными изометричными кавернами округлой формы размером до 10 см. Данная морфология поверхности свидетельствует о том, что в период предшествующий газовому выбросу под глинистым льдонасыщенным поверхностным горизонтом на глубине около 8-10 м за счёт пневморазрыва сформировалась линза сжатого газа. Подобное образование было получено при лабораторном моделировании воздействия сжатого газа на водонасыщенные грунты (Часть 3).

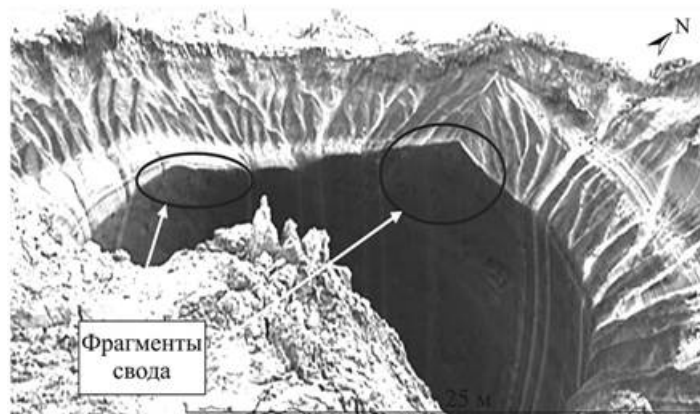


Рис. 13. Ямальский кратер. Остатки свода над газонасыщенной зоной, сохранившиеся после выброса. Июль 2014 г. Фото В.А. Пушкарева

Обнаруженная на Ямале в мае 2024 г. воронка имеет следующие размеры, глубина превышает 30 м. Диаметр верхней кромки бруствера кратера 30 м. Горловина расположена в массиве льда на глубине 6—8 м, ее диаметр — от 12,2 до 13,2 м (в среднем 12,7 м). В нижней части воронка расширяется до 26 - 41 м [20]. Вверху сужающейся части наблюдается, субгоризонтально ориентированный слой льда с разрывными и пластическими деформациями (рис. 14, 15). Данный слой подстилает слоистый грунтовый массив задраный вверх. Приподнятая часть ориентирована к центру воронки. Данное строение соответствует заключительной фазе трансформации мёрзлого массива перед взрывом. Поскольку, кратер занесён снегом, видны лишь отдельные фрагменты его криогенного строения.



Рис. 14. Верхней части воронки газового выброса обнаруженная на Ямале в мае 2024 г.

Фото В. И. Богоявленского [20]

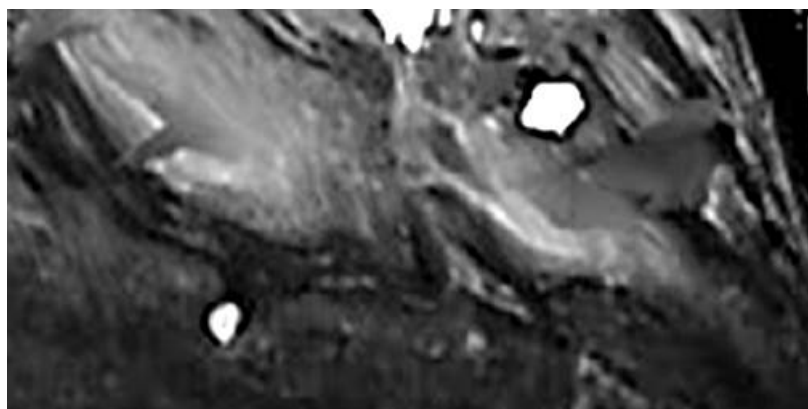


Рис. 15. Фрагмент рис. Пластические деформации
мерзлых пород верхней части воронки

Заключение

В первой части статьи показано морфологическое единство воронок газового выброса. Практически все обнаруженные воронки имеют трёхчленное строение. В нижней части воронок наблюдаются полости, достигающие десятки метров в поперечнике. В расположенной выше средней части поперечное сечение воронок уменьшается. В верхней части наблюдается расширение, в форме усечённого конуса. Вокруг воронки, как правило, располагается бруствер кольцевой формы, состоящий из выброшенных из кратера пород.

Отмеченная закономерность морфологии воронок газового выброса, обуславливается закономерной сменой стадий развития газодинамической геосистемы, предшествующей пневматическому взрыву. На начальном этапе формируется локальная зона накопления внутригрунтового газа с аномально высоким давлением. На промежуточной стадии формируется сужающаяся зона транзита газа. Она формируется на участке частичного разрушения зоны накопления газа. В зоне транзита газ, из области повышенного давления, движется к поверхности, значительно деформируя мёрзлый ледогрунтовой массив. Заключительная стадия развития газодинамической системы соответствует пневматическому выбросу мёрзлой кровли.

Для всех структурных элементов воронок газового выброса отмечаются признаки напорных процессов, выражающихся в широком распространении пластических и разрывных деформаций, признаков течения льда.

Библиография

1. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Часть 2 // Бурение и нефть. 2014. № 10. С. 4-8. EDN: SXDCEJ.
2. Богоявленский В. И. Газогидродинамика в кратерах выброса газа // Арктика: экология и экономика. 2018. № 1 (29). С. 48-54. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55. EDN: YWKVVU.
3. Лейбман М. О., Кизяков А. И. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа. 2016. № 2. С. 15-24.
4. Эпов М. И. и др. Бермудский треугольник Ямала // Наука из первых рук. 2014. Вып. 5

(59). С. 14-23. EDN: SYRRRB.

5. Хилимонюк В. З. и др. Гео-криологические условия территории расположения Ямальского кратера // V конференция геокриологов России. М.: Издательство Московского университета, 2016. Т. 2. С. 245-255.

6. Buldovich S. N. и др. Cryogenic hypothesis of the Yamal crater origin. Results of detailed studies and modeling. 5th European Conference on Permafrost - Book of Abstracts. 23 June - 1 July 2018. Chamonix, France. P. 97-98.

7. Buldovich S. N. и др. 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. EDN: VBFJYO.

8. Хименков А. Н. и др. Газовые выбросы в криолитозоне, как новый вид геокриологических опасностей // Геориск. 2017. № 3. С. 58-65. EDN: ZQJKVX.

9. Хименков А. Н. и др. Геосистемы газонасыщенных многолетнемерзлых пород, отв. ред. Ю. Д. Зыков. М.: Геоинфо, 2021. EDN: BCAKQS.

10. Chuvilin E. M. и др. Formation of Gas-Emission Craters in Northern West Siberia: Shallow Controls // Geosciences. 2021. 11 (9). 393. DOI: 10.3390/geosciences11090393. EDN: HLJDJE.

11. Романовский Н. Н. Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во МГУ, 1993. 336 с.

12. Хименков А. Н., Кошурников А. В. Локальные криогенные геосистемы. Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России "Мониторинг в криолитозоне" с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. М.: "КДУ", "Добросвет", 2022. С. 502-509. DOI: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130. EDN: ADUSBK.

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 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=27524

14. Кизяков А. И. и др. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на центральном Ямале // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 2. С. 15-25. EDN: TWMXKN.

15. Bogoyavlensky V. и др. New Catastrophic Gas Blowout and Giant Crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the Expedition and Data Processing // Geosciences. 2021. 11, 71. DOI: 10.3390/geosciences11020071. EDN: XWPMBU.

16. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Гагарин В.Е., Соболев П.А. О фильтрации газов в многолетнемерзлых породах в свете проблемы дегазации литосферы Земли и формирования естественных взрывных процессов в криолитозоне // Арктика и Антарктика. 2019. № 3. С. 16-38. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.3.29627 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=29627

17. Хименков А. Н., Кошурников А. В., Соболев П. А. Фильтрация газа в мерзлых грунтах // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2020. № 3. С. 97-103. DOI: 10.33623/0579-9406-2020-3-97-103. EDN: RZPOTC.

18. Чувилин Е. М. и др. Экспериментальное моделирование фильтрации газа в мерзлых и гидратосодержащих породах в условиях одноосного сжатия // Криосфера Земли. 2024. Т. XXVIII. № 6. С. 31-44. DOI: 10.15372/KZ20240603. EDN: GRTHXO.

19. Богоявленский В. И. и др. Выбросы газа из криолитозоны полуострова Ямал. Предварительные результаты экспедиции 8 июля 2015 г. // Бурение и нефть. 2015. № 7-8. С. 8-13. EDN: UFEMVN.

20. Богоявленский В. И. и др. Мониторинг развития Дуплетного объекта взрыва газа C22 на полуострове Ямал по данным дистанционного зондирования Земли // Арктика: экология и экономика. 2024. Т. 14. № 3. С. 320-333. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-

320-333. EDN: FCBZYH.

21. Галеева Э. И. и др. Сравнительный анализ строения полигонально-жильных и пластовых льдов // Материалы пятой конференции геокриологов России. МГУ имени М. В. Ломоносова, 14-17 июня 2016 г. Т. 2. Часть 5. Региональная и историческая геокриология. Москва: Университетская книга, 2016. С. 291-297. EDN: YOLUOB.

22. Блог "Мир вокруг: разное", 2017. На Ямале обнаружили новую воронку в земле. Дата обращения: 15.04.2021. URL: http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blogpost_9.html.
Официальный сайт RT, 2015. Тайна Ямальского кратера: корреспондент RT попытался разгадать загадку сибирских воронок. Дата обращения: 15.04.2021. URL: <https://russian.rt.com/article/105424>.

23. Vasily Bogoyavlensky и др. New Catastrophic Gas Blowout and Giant Crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the Expedition and Data Processing // *Geosciences*. 2021. 11, 71. DOI: 10.3390/geosciences11020071.

24. Официальный сайт RT, 2015. Дата обращения: 15.04.2021. URL: <https://russian.rt.com>.

25. Богоявленский В. И. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 1 (33). С. 88-105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105. EDN: TUHSJS.

26. Supplementary Materials for Cryovolcanism on the Earth: the Origin of the Spectacular Crater on Yamal Peninsula (Russia) S. N. Buldovicz и др. // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. DOI: 10.1038/s41598-018-31858-9.

27. Moss J. L., Cartwright J. 3D seismic expression of km/scale fluid escape pipes from offshore Namibia // *Basin Research*. 2010. Vol. 22. № 4. P. 481-501. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2010.00461.x. EDN: MYVQHJ.

28. Cartwright J., Santamarina C. Seismic characteristics of fluid escape pipes in sedimentary basins: Implications for pipe genesis // *Marine and Petroleum Geology*. 2015. Vol. 65. P. 126-140. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2015.03.023. EDN: UVHWDL.

29. Рыбак Е. Н., Ступина Л. В. Покмарки Черного моря // *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2019. 15. № 2. С. 16-34. DOI: 10.15407/gpimo2019.01.016. EDN: VDDNQT.

30. Щёлокова Д. В. Нетрадиционные углеводороды как источник неисчерпаемости топливно-энергетических ресурсов // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2016. № 1. С. 120-126. EDN: VZYTJV.

31. Бузанов К. В. Исследование и совершенствование технологии безаварийного бурения интервалов под направления и кондукторы разведочных и эксплуатационных скважин на месторождениях Восточно-Сибирского региона: на примере Куюмбинского нефтяного месторождения: автореферат дис. кандидата технических наук. Томск: Нац. исслед. Том. политехн. ун-т, 2018. 22 с. EDN: UFNVDS.

32. Shiyun Lei, Xiujun Guo, Haoru Tang. Experiment and analysis of the formation, expansion and dissipation of gas bag in fine sediments based on pore water pressure survey // *Acta Oceanol. Sin.* 2022. Vol. 41, No. 4. P. 91-100. DOI: 10.1007/s13131-021-1851-x. EDN: RXUXAS.

33. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Дернова Е.О. Газонасыщенные мёрзлые породы, как объект изучения геокриологии // *Арктика и Антарктика*. 2023. № 1. С. 26-64. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.1.40378 EDN: PLNGUD URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=40378

34. Арэ Ф. Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // *Криосфера Земли*. 1998. Т. II. № 4. С. 42-50.

35. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Т. 2:

Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. М.: ООО "Газпром Экспо", 2013. 424 с.

36. Ленченко Н. Н. Динамика подземных вод. М.: МГГУ, 2004. 65 с.

37. Bull J. M. и др. Constraining the physical properties of chimney/pipe structures within sedimentary basins. 14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-14. 21st -25th October 2018. Melbourne, Australia. 2018.

38. Хименков А. Н. и др. Взрывные процессы в области распространения многолетнемерзлых пород - новый вид геокриологической опасности // Геоэкология. 2019. № 6. С. 30-41. DOI: 10.31857/S0869-78092019630-41. EDN: JRXQRV.

39. Бобин В. А. Концептуальная модель геомеханических и взрывных процессов при формировании и развитии "Ямальского кратера" // Инженерная физика. 2021. № 5. С. 47-56. DOI: 10.25791/infizik.5.2021.1209. EDN: LCRNAB.

40. Цытович Н. А. Механика мёрзлых пород. М.: Высшая школа, 1973. 448 с.

41. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.

42. Микростроение мёрзлых пород / под ред. Э. Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 1988. 183 с.

43. Основы геокриологии. Ч. 1: Физико-химические основы геокриологии / под ред. Э. Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 1995. 368 с.

44. Стриха В. Е. Методическое пособие по дисциплине "Структурная геология", краткий курс лекций: учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2012.

45. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.

46. Паталаха Е. И. Новая концепция дислокационного процесса // В кн.: Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии. М.: Наука, 1985. С. 37-50.

47. Соломатин В. И. Физика и география подземного оледенения. Новосибирск: Акад. изд-во "Гео", 2013. EDN: VNJXSZ.

48. Круковская В. В. К расчету фильтрации газа в трещиновато-пористой неоднородной среде // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2004. Вып. 51. С. 257-265.

49. Тур В. В., Молош В. В. К определению сопротивления срезу при проверках на продавливание плоских плит монолитных перекрытий // Вестник Брестского государственного технического университета. 2011. № 1. С. 21-32.

50. Ahmad Mahmoud Abdullah. Analysis of Repaired/Strengthened R.C. Structures Using Composite Materials: Punching Shear. A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Sciences. 2010. 272 p.

51. Свидуневич Н. А., Окатова Г. П., Куис Д. В. Материаловедение и технология конструкционных материалов: лабораторный практикум с использованием металлографического комплекса. Минск: БГТУ, 2011.

52. Гумеров А. Г., Гумеров Р. С., Гумеров К. М. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов. М.: Недра-Бизнесцентр, 2003.

53. Цветков В. М., Сизов И. А., Сырников Н. М. О механизме дробления твердой среды взрывом // Доклады АН СССР. 1976. Т. 231. № 5. С. 1067-1069.

54. Вольфсон Ф. И., Яковлев П. Д. Структуры рудных полей и месторождений. Недра, Москва, 1975.

55. Горная энциклопедия. Т. 5. Советская энциклопедия, Москва, 1991.

56. Алидибиров М. А. Механизм фрагментации сильновязкой магмы при вулканических взрывах (экспериментальное исследование): автореф. дис. ... д. ф.-м. н. М., 1998. 44 с. EDN: ZKFVYJ.

57. Кедринский В. К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Издво СО РАН, 2000.

58. Панов В. К. Применение линейной теории нестационарной фильтрации для анализа экспериментов по разрушению пористого газонасыщенного материала // Вестник краунц. науки о Земле. 2009. № 1. Вып. № 13. С. 89-97. EDN: KTZSYN.
59. Панов В. К. Экспериментальное моделирование процессов при извержении типа "направленный взрыв" // Проблемы эксплозивного вулканизма. Материалы международного симпозиума. Петропавловск-Камчатский, 25-30 марта. Петропавловск-Кмчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006. С. 49-57.
60. Лейбман М. О., Плеханов А. В. Ямальская воронка газового выброса // Холод'ОК. 2014. № 2 (12). С. 9-15.
61. Bogoyavlensky V. I. и др. Complex of Geophysical Studies of the Seyakha Catastrophic Gas Blowout Crater on the Yamal Peninsula, Russian Arctic. Geosciences. 2020. 10, 215. [Google Scholar] [CrossRef].
62. Богоявленский В. И. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. 2019. № 1 (33). С. 88-105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105. EDN: TUHSJS.

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Предметом изучения являются воронки газового выброса, образующиеся в геокриолитной зоне. Автор в статье ставит вопрос, можно ли отнести воронки газового выброса к криогенным явлениям? Отвечая на данный вопрос, автор проводит анализ структурных и текстурных особенностей криогенного строения воронок газового выброса, который является основным источником информации о процессах, подготавливающих условия для реализации пневматического выброса.

Однако, название данной статьи не совсем соответствует стилю научной статьи, больше подходит как название научной монографии. В научных статьях не принято выделять часть 1, часть 2 и т. д.... Автор в данной статье рассматривает конкретные вопросы: морфологию воронок газового выброса, криогенное строение нижней расширенной части воронки газового выброса и криогенное строение средней (сужающейся) части воронки газового выброса. Поэтому название статьи должно соответствовать содержанию. Считаем, что наиболее подходящим было бы название статьи: «Морфология криогенных воронок газового выброса и особенности их строения (на примере Ямальского кратера)».

Тема исследований очень актуальна и является малоизученной, что требует более широкого проведения исследований. Общность факторов влияющих на внутригрунтовые процессы, обуславливает формирование закономерно организованных комплексов парагенетических криогенных образований. В локальном объёме массива мёрзлых пород, расположенном непосредственно над газонасыщенной зоной, происходит коренная перестройка первичного криогенного строения, идет формирование новых криогенных образований. Все эти изменения происходят в поле воздействия больших неравномерных давлений и высокого содержания газа. В Ямальском кратере грунтовая толща, слагающая цилиндрическую, сужающуюся часть, пронизана различного рода локальными пластическими и разрывными деформациями. Поэтому изучение морфологии криогенных воронок газового выброса и особенности их строения является актуальным вопросом как для науки, так и для практики.

Методология исследования автором не представлена в статье, ее желательно более

точно отразить в статье (описать методы, с помощью которых были проведены исследования). В статье имеется общая формулировка методологии: «Вследствие слабой разработанности рассматриваемой темы и незначительного объёма исходных фактических материалов был использован метод аналогий с привлечением материалов из различных областей наук о Земле, строительства, инженерной геологии и др.».

Стиль статьи соответствует научной монографии. Достоинством статьи являются фотографии объектов исследования, схемы воронок, подробные описания и комментарии к ним. Однако, нарушена сама структура научной статьи, которая в соответствии с требованиями журнала, должна включать в себя: актуальность, новизну, условия и методы исследований, результаты и их обсуждения и заключение. Здесь необходима доработка. В надписях к рисункам нужно придерживаться единых требований оформления.

Библиография статьи слишком обширна, включает в себя 62 литературных источника, это «утяжеляет» статью. Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на литературные источники.

В выводах статьи отмечена закономерность морфологии воронок газового выброса, обуславливаемая закономерной сменой стадий развития газодинамической геосистемы, предшествующей пневматическому взрыву. Автор отмечает., что для всех структурных элементов воронок газового выброса отмечаются признаки напорных процессов, выражающихся в широком распространении пластических и разрывных деформаций, признаков течения льда.

Данная статья будет полезна широкому кругу ученых и может быть опубликована в журнале «Арктика и Антарктика» после незначительной доработки.

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Харитонов А.Л. Прогнозные оценки углеводород-перспективных областей Антарктики по геофизическим данным, измеренным в пределах концентрических геоморфологических особенностей земной коры и ледникового покрова // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.74166 EDN: RLYJKU URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74166

Прогнозные оценки углеводород-перспективных областей Антарктики по геофизическим данным, измеренным в пределах концентрических геоморфологических особенностей земной коры и ледникового покрова

Харитонов Андрей Леонидович

ORCID: 0000-0002-0843-452X

кандидат физико-математических наук

ведущий научный сотрудник; лаборатория главного магнитного поля Земли; Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

108818, Москва, Десеновское, 3-я Нововатулинская, д.7, кв.56

✉ Haritonov-magnit@yandex.ru



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

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.2.74166

EDN:

RLYJKU

Дата направления статьи в редакцию:

20-04-2025

Аннотация: Предметом исследования настоящей статьи являются концентрические геоморфологические особенности, выявленные на территории Антарктиды в ледниковом покрове, сейсмоструктурном строении земной коры, значениях теплового потока, количества озер. Ранее были выявлены взаимосвязи географического расположения концентрических геоморфологических особенностей и дегазации метановых сипов из подледниковых слоев земной коры на территории Арктики. В статье исследуются концентрические особенности, выявленные по результатам оцифрованных карт рельефа разноглубинных поверхностей (поверхность ледников, «кровля», «подошва» земной коры), значений теплового потока, количества озер на территории Антарктиды по спутниковым, наземным геофизическим данным, используемых для поиска

месторождений углеводородов. Область применения результатов связана с вероятностным прогнозированием регионов, которые являются перспективными для проведения поисковых работ и разведки новых залежей углеводородов на территории Антарктиды. При этом использовались эталонные статистические данные о плотностях распределения мощности коры, теплового потока, соответствующих распределению Гаусса, характерных для концентрических особенностей нефтегазоносных бассейнов России. Впервые показано, что пространственное расположение количества подледниковых озер в пределах определенных площадей концентрических геоморфологических особенностей на территории Антарктиды может быть аппроксимировано в соответствии с распределением описываемым законом Пуассона. Методы проведенного исследования, основаны на положениях теории вероятностей и статистики. Построены гистограммы, плотности распределения, определен средний риск (критерий Бейеса), порог принятия решения значений теплового потока, площадей концентрических особенностей, нормированных на количество подледниковых озер в них, измеренных в пределах расположения 48 концентрических особенностей. Научная новизна проведенных исследований заключается в том, что впервые были определены координаты географического расположения, пространственные размеры (диаметры 200-1000 километров) и сделаны оценки вероятностей, позволяющих прогнозировать углеводород-перспективность 48 концентрических геоморфологических особенностей, выявленных на поверхности ледникового покрова и верхнем и нижнем слоях земной коры на территории Антарктики. Основные выводы проведенного исследования заключаются в выявленных взаимосвязях углеводород-перспективных концентрических геоморфологических особенностей сейсмоструктурного строения земной коры (Мохо), значений теплового потока и плотности распределения подледниковых озер на территории Антарктиды. Практическая новизна исследования заключается в том, что впервые выполнено математическое прогнозирование наличия углеводород-перспективных концентрических геоморфологических особенностей на территории Восточной и Западной Антарктиды.

Ключевые слова:

Антарктика, концентрические геоморфологические особенности, количество подледниковых озер, методы теории вероятностей, прогноз углеводород-перспективных регионов, спутниковые данные, тепловой поток, структуры ледникового покрова, мощность земной коры, мантийные плюмажи

Введение

Одним из самых больших по занимаемой площади (14 млн. кв. км), но слабоизученных континентов южного полушария Земли остается территория Антарктики. С учетом шельфовых зон окружающих морей площадь Антарктического континента составляет около 16 млн. кв. км. Этот громадный южный континент, как известно, был открыт в 1819 году российскими мореплавателями Михаилом Лазаревым и Фаддеем Беллинсгаузеном. Большой вклад в изучение глубинного строения Антарктического континента внесли многие российские и зарубежные ученые. Перечислим некоторые научные работы по изучению глубинного строения Антарктики [\[3\]](#); [\[5\]](#); [\[7-8\]](#); [\[10-11\]](#); [\[12\]](#); [\[15\]](#); [\[19-21\]](#); [\[25-26\]](#); [\[27-31\]](#). По прогнозам некоторых экспертов недра Антарктики содержат огромное количество разнообразных природных ресурсов. С 2035 года прекращается международный мораторий на запрет разработки недр на территории Антарктиды. Многие

страны уже начинают готовиться к этому событию, объявляя отдельные регионы Антарктиды своей собственностью. Однако, глубинное строение земной коры на территории Антарктиды долгое время оставалось слабоизученным с помощью наземных геолого-геофизических методов из-за суровых погодных условий (постоянные сильные ветры, низкие температуры воздуха до -89°C , высокий радиационный фон, озоновые «дыры») и сложностей исследования земной коры из-за мощного (4-х километрового) слоя ледников, покрывающих большую часть этого континента (рис. 1).

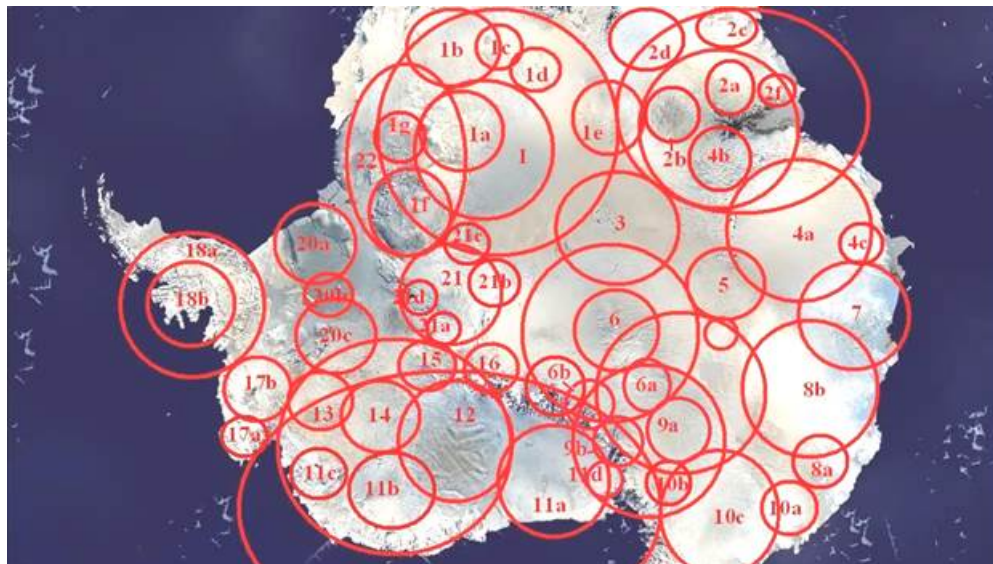


Рис. 1. Карта ледникового покрова на поверхности Антарктиды, по данным [1 с дополнениями автора]. Номера и названия крупных концентрических геоморфологических особенностей (КГО), выделенных автором в рельефе ледникового покрова Антарктиды: 1а – Квин-Модская, 1b – Мауд-Лэндская, 1с – Карпинская, 1d – Бельжикская, 1е – Домефская, 1f – Фаравейская, 1g – Котсовская, 2а – Принц-Чарльзская, 2b – Шунинская, 2с – Кемпская, 2d – Эндербиевская, 2f – Ламбертская, 3 – Советская, 4а – Короткевичская, 4b – Моусонская, 4с – Максимовская, 5 – Восточно-Озерская, 6а – Гамбурцевская, 6b – Александровская, 7 – Голицинская, 8а – Шмидтовская, 8b – Уилксовская, 9а – Конкорд-Озерская, 9b – Керк-Патрикская, 10а – Аделиевская, 10b – Шеклтонская, 10с – Георг-Лэндская, 11а – Росса-Ледниковая, 11b – Сидли-Горская, 11с – Терра-Бэрдская, 11d – Эребусская, 12 – Мэри-Бэрдская, 13 – Бэрдская, 14 – Северо-Бэрдская, 15 – Амундсенская, 16 – Южно-Полюсная, 17а – Сайпллская, 17b – Элсуортская, 18а – Беллинсгзаузенская, 19а – Северо-Уэдделская, 20а – Фильхнерская, 20b – Ронневская, 20с – Винсонская, 21 – Бельгранская, 22 – Скоша-Лэндская.

Все это до последнего времени не позволяло найти месторождения полезных ископаемых на территории Антарктиды. Поэтому в настоящей статье сделана попытка с помощью спутниковых геофизических съемок [1]; [6]; [20-24] изучить глубинное строение Антарктиды, скрытое под мощным (4-х километровым) ледниковым покровом (рис. 1). Например, оптические спутниковые космofотосъемки [1] позволили выделить крупные (диаметром 200-1000 км) концентрические геоморфологические особенности (КГО), наблюдаемые в рельефе ледникового покрова Антарктиды (рис. 1). Геоморфологические особенности ледникового покрова Антарктиды отражают в своей структуре все неоднородности, связанные с различными геолого-геофизическими процессами, происходившими в ее литосфере. Например, зоны повышенного теплового потока [22]; [25]; [27-28]; [30] и наличие впадин в рельефе кристаллического фундамента часто

создают КГО в виде ледниковых концентрических депрессий. Поэтому каждая КГО выделенная в рельефе ледникового покрова Антарктиды (рис. 1) обладает своеобразным рисунком поверхностной структуры ледового покрытия КГО, отличным от других окружающих ее КГО. Иногда внешние границы КГО, выделенные по данным космофотоснимков ледникового покрова Антарктиды, за счет подвижности (сползания) ледников немного смещаются относительно внешних границ КГО, выделенных на поверхности кристаллического основания земной коры. Часто бывает, что в пределах более крупной КГО, по своему пространственному размеру, расположены более мелкие (т.н. «дочерние») локальные КГО [2]; [4]; [9]. Таким образом, кроме крупных КГО (рис. 1), выделенных автором по результатам спутниковых исследований [1]; [20-24], на поверхности ледникового покрова Антарктиды, были обнаружены небольшие по размеру, входящие в более крупную Голицинскую КГО, (т.н. «дочерние») локальные концентрические геоморфологические особенности (КГО) (в области с географическими координатами 66°19'13"S, 100°29'43"E), которые представлены на ниже следующем рис. 2.



Рис. 2. Локальные концентрические геоморфологические особенности (КГО), выделенные в рельефе поверхности ледникового покрова и в верхних слоях земной коры Антарктиды, в пределах Голицинской КГО [24].

Пространственный размер, выделенных в пределах Голицинской локальной КГО на поверхности Антарктиды составляет около 100-300 метров (рис. 2). Эти локальные концентрические геоморфологические особенности, выделенные на поверхности ледникового покрова и в верхних слоях земной коры Антарктиды имеют сложную кольцевую структуру, состоящую из двух концентрических областей (внутреннюю и внешнюю). Внутренняя (центральная) концентрическая область рассматриваемых локальных КГО это приподнятая над поверхностью ледникового покрова куполообразная область. Внешняя (периферийная) концентрическая область КГО это депрессивная (с ледниковыми озерами) кольцевая область, разбитая радиальными разломами.

Аналогичные локальные КГО недавно выявили на полуострове Ямал [2], Новая Земля [4], Чукотка [9], возникающих в результате таяния слоев вечной мерзлоты и прорыва в атмосферу газовых (метановых) сипов. В результате быстро сформировались глубокие концентрические провалы почвы. Например, 17 августа 2015 года было зафиксировано возникновение глубочайшего концентрического провала почвы на полуострове Ямал,

возникшего в результате взрыва метана [2] (рис. 3).

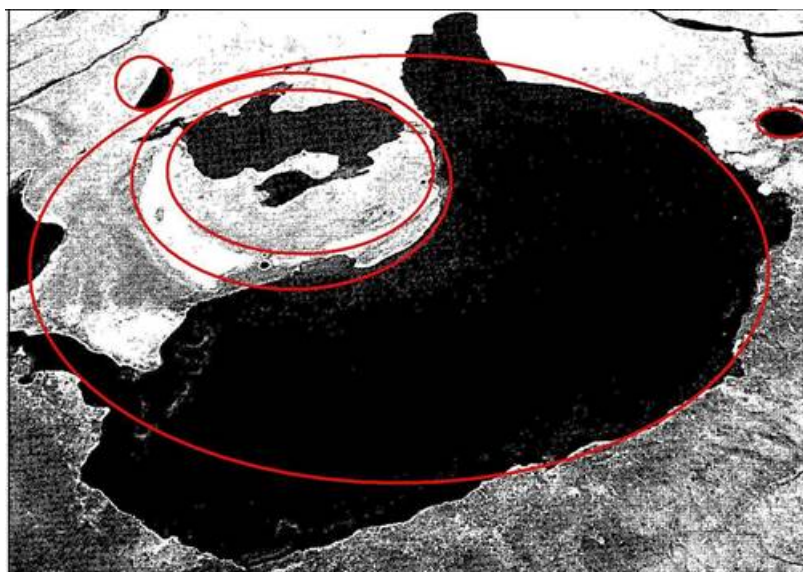


Рис. 3. Локальные концентрические геоморфологические особенности (концентрические провалы почвенного слоя заполненного водой или концентрические цепочки озер), выделенные на севере полуострова Ямал [2 с дополнениями автора].

На рис. 3 представлена локальная концентрическая геоморфологическая особенность (КГО) рельефа дневной поверхности полуострова Ямал, также состоящая из внутренней приподнятой части КГО и периферийной депрессивной части в виде полукольцевой формы озера, возникшего в результате заполнения водой кольцевого кратера этой КГО, сформированного взрывом (выбросом) метана и других природных углеводородов (ПУВ) из земных недр. Эти локальные КГО, как было выявлено [2], возникли в результате уменьшения (таяния) слоев вечной мерзлоты, вследствие общего повышения средней по планете температуры приземной атмосферы. Аналогичные локальные КГО, зафиксированные на территории Антарктиды (рис. 2) по своей геоморфологической структуре очень похожи на локальные КГО, связанные с выбросами газообразных ПУВ, выявленными на севере полуострова Ямал [2] (рис. 3).

Исходные данные

Измерений, проведенных с помощью магнитного, гравитационного, теплового полей, на поверхности ледникового покрова Антарктиды было крайне недостаточно, для выполнения детального исследования глубинного строения Антарктического региона. На сегодняшний день известно, что пока надежно определена только глубина расположения поверхности Кюри в районе залива Скоша (Скоша-Лэндская КГО), рассчитанная по наземным измерениям магнитного поля составляет от 4 до 37 км [8]. Кроме того, на территории Антарктиды имеются отдельные сейсморазведочные измерения земной коры, выполненные российскими учеными. Например, одно из них сделано вдоль профиля в районе российской антарктической станции Новолазаревская [7] на территории занимаемой Мауд-Лэндской (1b) КГО (рис. 4).

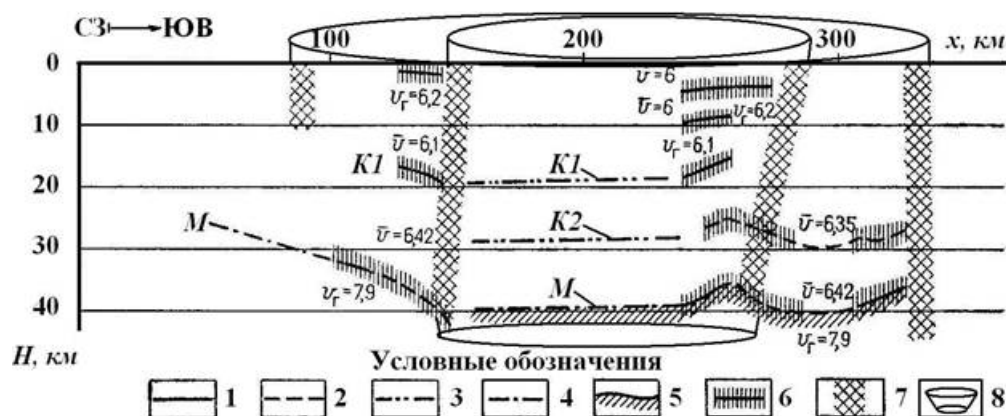


Рис. 4. Глубинный разрез земной коры Антарктиды по данным сейсморазведки [7 с дополнениями автора] на территории Мауд-Лэндской концентрической геоморфологической особенности (КГО) земной коры. Условные обозначения: 1 – расположение уверенно выделенных сейсмических границ; 2 – расположение неуверенно выделенных сейсмических границ; 3 – участки интерполяции сейсмических границ Конрада-1 ($K1$) и Конрада-2 ($K2$); 4 – расположение субгоризонтальных сейсмических границ, подтвержденных гравиметрическими данными; 5 – расположение границы Мохоровичича (M); 6 – зоны интерполяции сейсмических границ; 7 – зоны субвертикальных дизъюнктивных нарушений земной коры; u , u_r – обозначения средней и граничной скорости распространения сейсмических волн (км/сек); 8 – субгоризонтальные и субвертикальные границы Мауд-Лэндской КГО, сформированной мантийным плюмажем (астеноконом).

Из данных сейсморазведки, представленных на рис. 4 можно сказать, что скорости распространения продольных волн от поверхности кристаллического фундамента («кровли» земной коры) до поверхности Мохоровичича (M) («подшвы» земной коры), в пределах Мауд-Лэндской КГО на севере восточной (платформенной) части Антарктиды изменяются от 6.0 до 7.9 (км/сек). В соответствии с данными сейсморазведки (рис. 4) границы Конрада-1 ($K1$), Конрада-2 ($K2$), Мохоровичича (M) в пределах Мауд-Лэндской КГО расположены соответственно на глубинах 19, 29, 40 километров. По данным сейсморазведки (рис. 4) пространственный размер (диаметр) внешнего кольца Мауд-Лэндской КГО составляет около 250 километров, а его внутреннего кольца около 150 километров.

Также автором были использованы наземные региональные сейсмотомографические [26] данные, позволившие построить карту глубинного строения земной коры Антарктиды и окружающих морей (сейсмотомографический срез земной коры), дающей представление о мощности земной коры Антарктиды, в том числе и в районах географического расположения КГО (рис. 5).

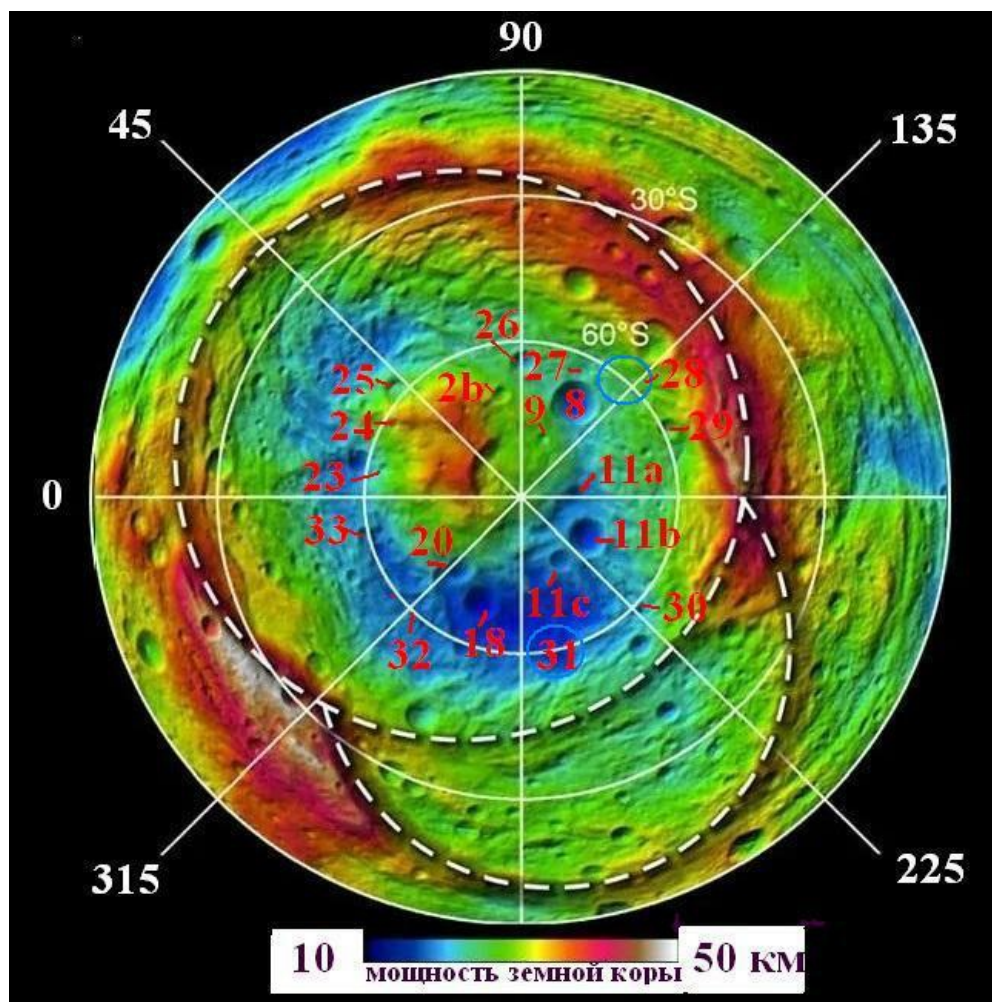


Рис. 5. Карта неоднородностей мощности земной коры, построенная по данным сейсмотомографии [26 с дополнениями автора] для территории Антарктиды и прилегающих акваторий с выделенными концентрическими геоморфологическими особенностями (КГО). Условные обозначения: номера и названия некоторых крупных КГО на территории Антарктиды: 2b – Щунинская; 8b – Уилксовская; 9 – Восточно-Озерская; 11a – Росса-Ледниковая; 11b – Сидли-Горская; 11c – Терра-Бэрдская; 18 – Беллинсгаузенская; 22 – Бельгранская; 23 – Лазаревская; 24 – Рисерская; 25 – Космонавтовская; 26 – Дейвиская; 27 – Победо-Морская; 28 – Адели-Морская; 29 – Дюрвильская; 30 – 225-градусная; 31 – Тваитесская; 32 – Скоша-Морская; 33 – 345-градусная.

Например, по данным сейсмотомографии [26] автором настоящей статьи были выделены аналогичные концентрические геоморфологические особенности (Щунинская, Уилксовская, Восточно-Озерская, Беллинсгаузенская и др.), сформировавшиеся в разрезе земной коры Антарктиды и морей, расположенных вокруг Антарктиды (рис. 5). Некоторые ученые [29], [31] считают, что вся территория Антарктики является глобальной концентрической геоморфологической особенностью (рис. 5), сформированной гигантским мантийным плюмажем (гигаконом) и его региональными и локальными субвертикальными ответвлениями (геоконами, мезоконами, астеноконами, диапирами) (рис. 6).

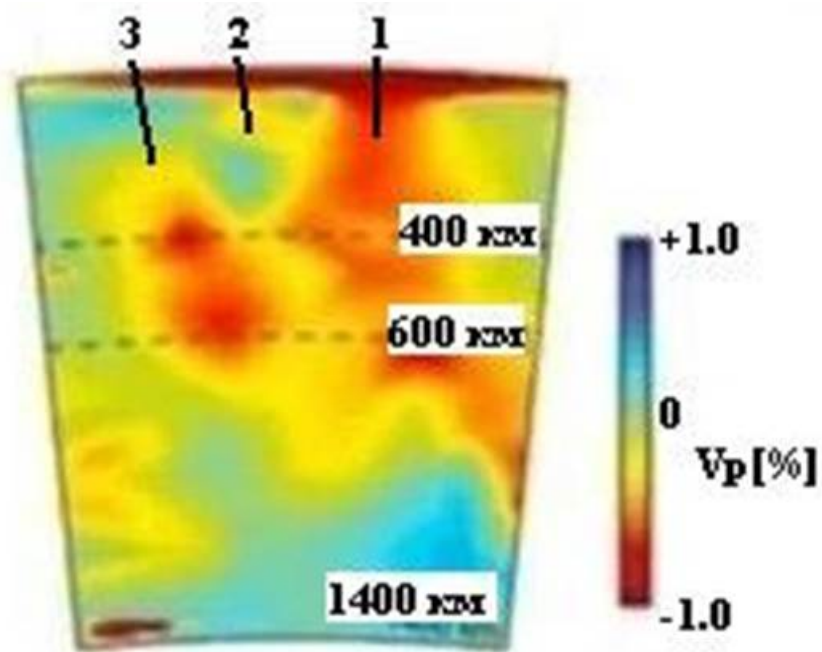


Рис. 6. Вертикальный сейсмотомографический разрез глубинной структуры нижнемантийного плюмажа (Терра-Бэрдского геокона) (1) и «дочерних» мезомантийного плюмажа (мезокон) (3) и верхнемантийного плюмажа (астенокон) (2) на территории Антарктиды (неоднородности сейсмоскоростной структуры плюмажей мантии, выделены красным и желтым цветом) (в % отклонения от средней скорости сейсмических V_p -волн) [29 с дополнениями автора]. 1 – пример типичного (так называемого «материнского») антарктического нижнемантийного плюмажа, расположенного на западе Антарктиды (11с – Терра-Бэрдский геокон); 2 – «дочерний» антарктический верхемантийный плюмаж (Бэрдский астеноскон); 3 – «дочерний» антарктический мезомантийный плюмаж (Винсонский мезокон).

Общую структуру типичных мантийных плюмажей Антарктиды, определенную по сейсмическим (V_p) данным можно видеть на выше представленном сейсмотомографическом разрезе (рис. 6), показывающему субвертикальную структуру т.н. «материнского» Терра-Бэрдского нижнемантийного плюмажа (1), расположенного в западной части Антарктиды, с боковыми мезо- и верхне-мантийными ответвлениями «дочерних» мантийных плюмажей (2-Бэрдского, 3-Винсонского). Из сейсмотомографического разреза мантии (рис. 6) видно, что корни Терра-Бэрдского нижнемантийного плюмажа (геокон) Западной Антарктиды расположены на глубине более 1400 километров. Региональные КГО (радиусом 200-1000 км) (рис. 1), сформированные антарктическими астеноконками, мезоконками, геоконками (с «корнями» на глубине около 200-1500 км), могут позволить выделить углеводород-перспективные и бесперспективные регионы для дальнейшей постановки детальных наземных геолого-разведочных (сейсморазведочных) исследований месторождений природных углеводородов (ПУВ), подобно исследованиям, проведенным в работе [16]. Локальные (100-300 м) концентрические геоморфологические особенности земной коры, выявленные в ледниковом покрове Антарктиды, в пределах более крупной Голицинской КГО (рис. 2), сформированы допалеозойскими мантийными плюмажами (ДМП) и диапирами (ДПМД) [16]; [29]; [31], через разломные структуры которых происходит дегазация-дегидратация мантии [12]; [14] и тепломассоперенос разогретых мантийных геофлюидов в верхние слои земной коры [2]; [9], часто содержащих, в том числе, и ПУВ.

Аналогичные КГО, были выделены автором на территории российского сектора Арктики и Субарктики [16] с найденными там многочисленными месторождениями ПУВ. Можно предположить, что и на территории Антарктиды также могут быть найдены подобные месторождения ПУВ. Если на территории Антарктиды, по региональным исследованиям автора настоящей статьи, будут найдены первые месторождения ПУВ, то они повысят интерес к более активному освоению территории Антарктиды. В дальнейшем это может избавить расположенные там российские исследовательские антарктические станции от ежегодного завоза горючего с территории нашей страны. Но, для поиска месторождений ПУВ на территории Антарктиды пока можно использовать только ограниченное количество наземных геолого-геофизических данных (ГГД) из-за их недостатка, вследствие относительно слабой изученности этой огромной территории, особенно в ее центральных регионах восточной (материковой) части. Поэтому для изучения особенностей глубинного строения всей территории Антарктиды и прилегающих акваторий автором были использованы достаточно детальные спутниковые данные, полученные в последнее время (альтиметрические [20], [21], различного диапазона (инфракрасные, ультрафиолетовые) радарные измерения, измерения магнитного поля (рис. 7) [23]).

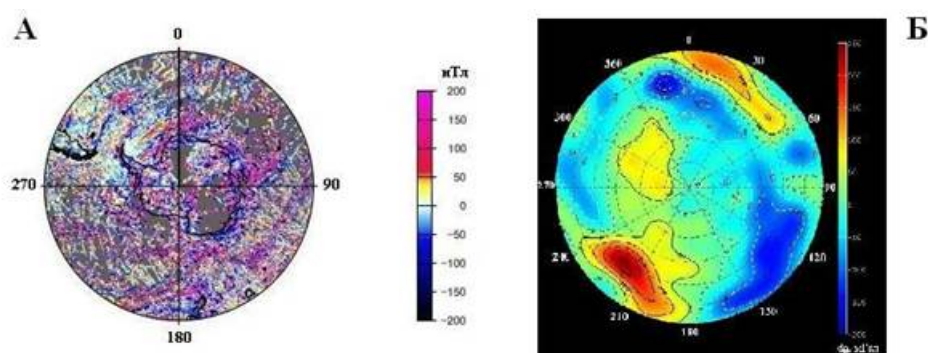


Рис. 7. Спутниковые карты аномалий магнитного (А) и гравитационного (Б) полей Антарктиды и прилегающих морей по данным искусственных спутников Земли (ИСЗ) MAGSAT [23], GOCE [20], [21].

Известно, что из-за очень сложных природных условий, наземных геофизических данных, измеренных на поверхности Антарктиды было выполнено крайне недостаточно, и особенно, в ее центральных регионах. Поэтому автору этой статьи пришлось использовать вспомогательные геоморфологические данные, полученные по спутниковым измерениям [1], [20-24]. Например, из данных о геоморфологии особенностей ледникового покрова Антарктиды, представленных на рис. 1, видно, что в рельефе ледникового рельефа отчетливо просматриваются некоторые концентрические геоморфологические особенности (КГО) разного пространственного размера (диаметра) и разной структурой ледниковой поверхности. Кроме того, достаточно неплохо относительно других геофизических методов, на территории Антарктики были изучены значения региональных аномалий гравитационного поля (рис. 7Б) по спутниковым гравиметрическим (альтиметрическим) [20], [21] данным, результаты которых были использованы для уточнения глубины расположения поверхности Мохоровичича. По наземным измерениям гравитационного [15] и волнового [7-8], [10-11], [19] полей и спутниковым магнитным (рис. 7А) [23] и спутниковым гравиметрическим (альтиметрическим) измерениям (рис. 7Б) [20], [21] была построена карта рельефа

поверхности Мохоровичича (вертикальной мощности земной коры - H_K) для территории Антарктиды и сопредельных морей (рис. 8).

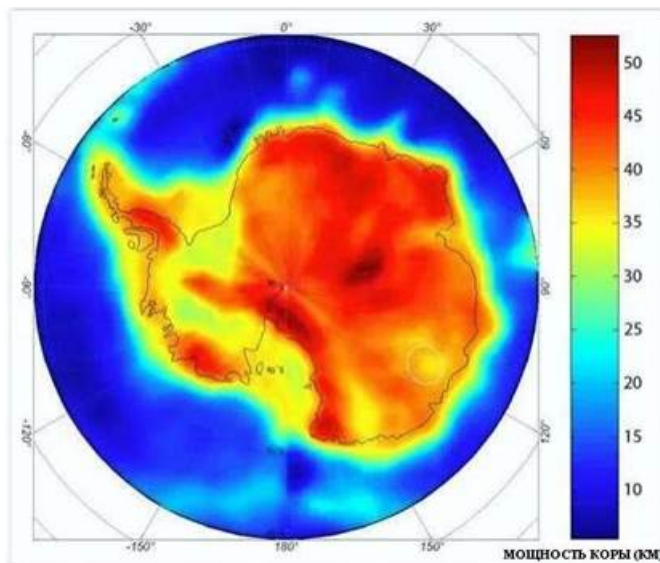


Рис. 8. Карта мощности земной коры (глубины до поверхности Мохоровичича (M)) на территории Антарктиды и сопредельных морей по данным [7-8]; [10-11]; [15]; [19].

По данным карты мощности земной коры (глубины до поверхности Мохоровичича (M)) для территории Антарктиды (рис. 8), можно сказать, что среднее значение вертикальной мощности земной коры (H_K) в восточной (платформенной) части Антарктиды составляет около $H_K = 40$ километров, а в ее западной (палеорифтовой) части около $H_K = 30$ километров. Но, как можно видеть из данных, приведенных на рис. 8, что и восточной части Антарктиды имеются определенные области, где мощность земной коры не превышает $H_K \approx 30$ километров. Аналогичные области с небольшой мощностью земной коры характерны для нефтегазоносных областей Западной Сибири, Ямала [3]; [5]. По многочисленным геофизическим данным [7]; [8]; [10-11]; [15]; [19] была построена и тектоническая карта для территории Антарктиды [13] (рис. 9).

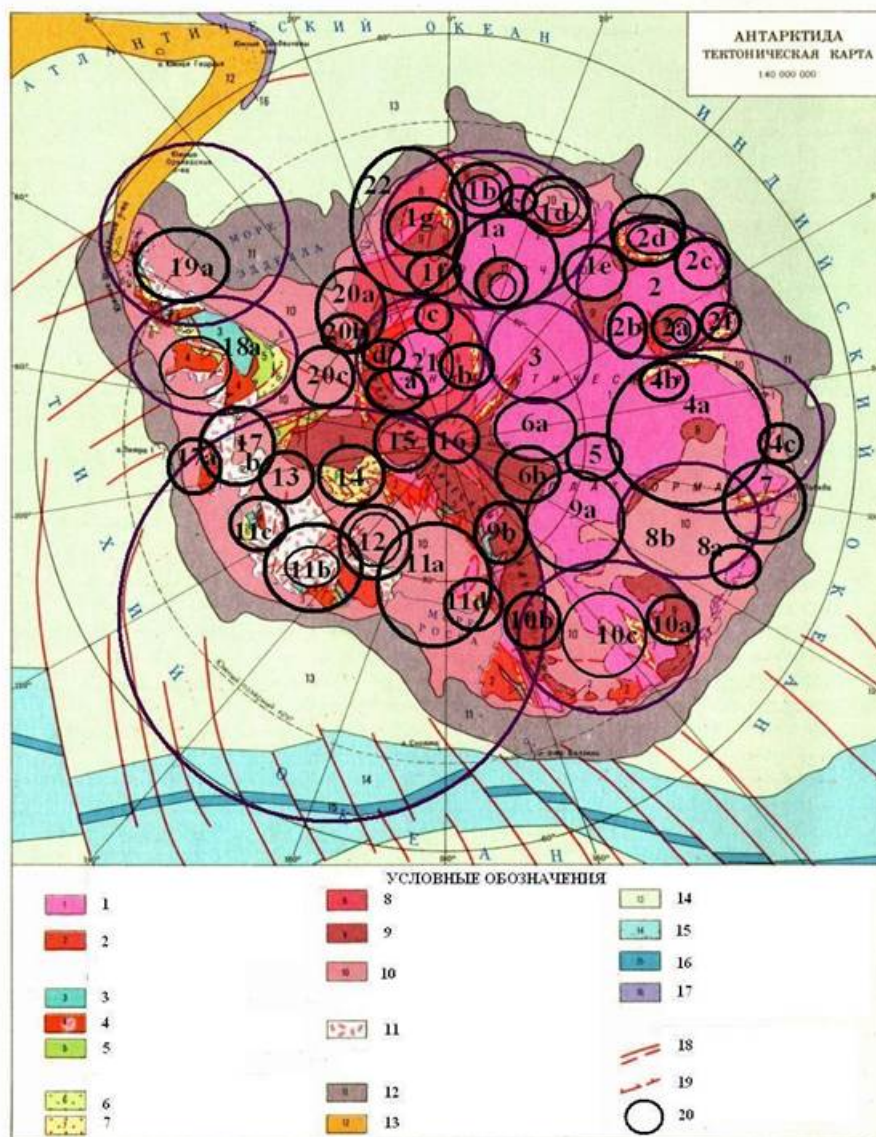


Рис. 9. Тектоническая карта территории Антарктиды [13 с дополнениями автора].
 Условные обозначения: континентальная земная кора: 1 – выступы раннедокембрийского кристаллического фундамента; 2 – выступы позднедокембрийского метаморфического фундамента; складчатые комплексы: 3 – раннепалеозойские; 4 – позднепалеозойские; 5 – мезозойские; передовые и межгорные прогибы: 6 – позднемезозойские; 7 – кайнозойские рифтогенные; возраст пород платформенного чехла: 8 – протерозойский; 9 – фанерозойский; 10 – мезозойско-кайнозойский; 11 – кайнозойский платформенный вулканизм; переходные зоны от континента к океану: 12 – континентальный склон; 13 – островные дуги; зоны субокеанической коры: 14 – позднемезозойские; 15 – срединно-океанические хребты; 16 – рифтовые зоны срединно-океанических хребтов; 17 – глубоководные желоба; 18 – тектонические разломы; 19 – рифтовые зоны; 20 – номера и названия КГО, обозначенных на тектонической карте смотрите в условных обозначениях к рис. 1.

Основываясь на данных, представленных на тектонической карте (рис. 9), территорию Антарктиды в региональном плане можно разделить на древнюю (рифейского возраста) земную кору континентального типа Восточно-Антарктической платформы и более молодую (раннемезозойского возраста) кору рифтогенного субокеанического (переходного к океаническому) типа Западно-Антарктической складчатой области. Из данных представленных на рис. 9 видно, что КГО в центральной и восточной части

Антарктиды (например, 1b – Мауд-Лэндская, 1d – Бельжикская, 2a – Принц-Чарльзская, 2d – Эндербиевская, 10с – Георг-Лэндская, центральная часть 21 – Бельгранской КГО) в центральных концентрических областях чаще всего сложены породами раннедокембрийского кристаллического фундамента (обозначение 1 в усл. обозн. Рис. 9), а периферийные кольцевые области сложены выступами протерозойского возраста (обознач. 8 в усл. обозн. Рис. 9) и фанерозойского возраста (обознач. 9 в усл. обозн. Рис.9).

К сожалению, значения аномалий теплового потока (АТП) (Q) на территории Антарктиды по наземным измерениям изучены пока только в одном из ее районов (о. Росс) [28]. Но в последнее время появились спутниковые данные об АТП [22], [27], [30], поступающего с подледниковой поверхности Антарктиды (рис. 10).

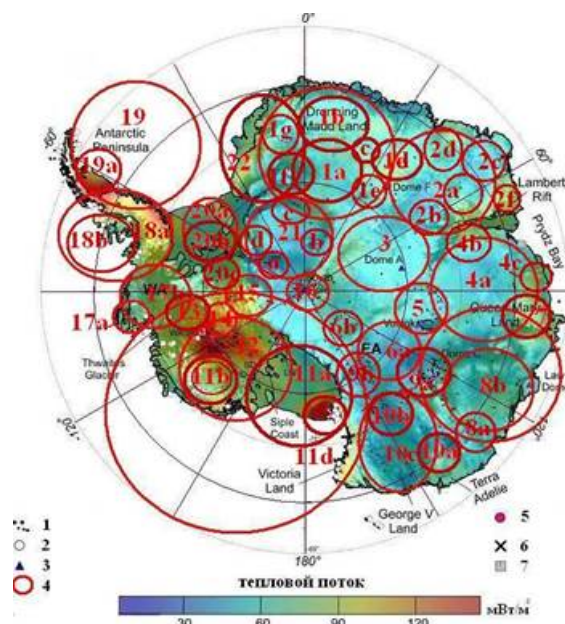


Рис. 10. Карта аномалий теплового потока (АТП) на территории Антарктиды [22 с дополнениями автора]. Условные обозначения: 1 – географическое расположение подледниковых озер («линз» гидротермальных геофлюидов); 2 – место географического расположения вулканов; 3 – место географического расположения источников воды (ключей); 4 – индексы и названия КГО, обозначенных на карте АТП смотрите в условных обозначениях к рис. 1; 5 – место расположения пунктов измерения теплового потока; 6 – пункты измеренных значений АТП; 7 – пункты смоделированных значений АТП.

По спутниковым данным карты аномалий теплового потока (АТП) (рис. 10) автором также были выделены концентрические геоморфологические особенности (КГО) на территории Антарктиды, которые по своему пространственному расположению аналогичны географическому расположению КГО, выделенных по данным тектонической карты (рис. 9) и карты ледникового покрова (рис. 1). В некоторых из этих антарктических КГО (рис. 10) плотность распределения подледниковых озер значительно выше, чем в окружающих КГО, представленных на рис. 10. То есть, на территории Антарктиды (рис. 10), существует несколько КГО с высокими и очень высокими значениями плотности распределения подледниковых озер (например, 1d – Бельжикская, 1e – Домефская, 1f – Фаравейская, 5 – Восточно-Озерская, 9 – Конкорд-Озерская, 10с – Георг-Лэндская, 12 – Мэри-Бэрдская, 16 – Южно-Полюсная, 20с – Винсонская, 21d – Северо-Бельгранская).

Методы исследования

Предлагаемые вероятностно-статистические методы [18] позволяют выполнить надежное количественное исследование по прогнозированию углеводород-перспективных КГО на территории Антарктиды. Для поиска месторождений природных углеводородов (ПУВ) были использованы разные данные, полученные как в результате применения основных геофизических методов (гравиразведка, космомагниторазведка, геотермия, сейсморазведка) [3-4], [7-11], [21], [23], [25-26], [27-28], [29-31], так и вспомогательных геоморфологических [6] методов (спутниковые геодезические методы определения высот рельефа ледниковой (рис. 1) [1], [24] и подледниковой поверхности (рис. 9), а также спутниковые радарные методы просвечивания ледникового покрова и верхнего слоя земной коры, методы анализа расположения гидротермальных ключей подледниковой озерной сети (рис. 10)) [22]. Одним из важных геоморфологических методов, который был использован автором для поиска месторождений ПУВ на территории Антарктиды, является выделение зон гидротермальной или газотермальной (в том числе вулканической) дегазационной деятельности земных недр (анализ плотности распределения подледниковых озер (рис. 10)). То есть, исходя из теоретических предпосылок, чем больше на территории Антарктиды будет найдено источников гидротермальной или газотермальной (дегазационной) [12], [14] деятельности недр, тем выше вероятность нахождения в этих КГО залежей ПУВ. Поэтому, на поверхности кристаллического фундамента земной коры, под мощным ледниковым щитом Антарктиды, автором были выявлены, по спутниковым фото [1], [24], геотермальным [22] данным, крупные линзы жидкости (подледниковые озера) (рис. 10), которые также могут содержать в составе подледниковой озерной жидкости значительное количество жидких ПУВ или природного газоконденсата, по аналогии с газовыми сипами арктических морей и дегазации метана в атмосферу в Чукотской тундре [9] и формирования огромных провалов в зонах таяния слоев вечной мерзлоты в Ямальной тундре [2] в результате прорывов залежей метана из-под слоев вечной мерзлоты.

Для расчетов углеводород-перспективных КГО на территории Антарктиды автором были использованы как цифровые данные полученные из комплекса геофизических методов, позволившие определить значения вероятности $P_1(H_K)$ в зависимости от глубины до поверхности Мохоровичича (от значений вертикальной мощности земной коры) (рис. 8), значения вероятности $P_2(Q)$ в зависимости от значений аномалий теплового потока (рис. 10), значения вероятности $P_3(s^*)$ в зависимости от значения площади КГО (s^*), нормированной на количество подледниковых озер ($n_{оз}$) (рис. 10), расположенных в пределах каждой КГО на территории Антарктиды. Целый ряд исследователей глубинного строения Антарктиды [5-8], [10-13], [15], [19-31] показывают, что территорию Антарктиды необходимо анализировать отдельно в восточной и западной ее частях. Это связано с тем, что большая часть исследователей территорию Восточной Антарктиды относит к платформенным регионам, а территорию Западной Антарктиды к рифтогенным регионам. При этом все известные вероятностные критерии принятия решений о наличии или отсутствии «полезной аномалии» в исследуемых геофизических данных, были приняты на основе теории проверки статистических гипотез (I-го и II-го рода) [18]. Для проверки статистических гипотез была использована информация о цифровых данных, представленных на гистограммах $N(\Phi_i)$ и графиках плотностей распределения для гипотезы наличия $p(\Phi_i/H_1)$ и отсутствия $p(\Phi_i/H_0)$ «аномалии» в анализируемых видах геофизических данных.

Для проведения расчетов с помощью вероятностно-статистических методов исследования [18] мы обозначили фиксированную выборку ряда из j исследуемых значений $f(x_j)$ для каждого вида геофизических данных ($\Phi_i(x_j)$) как:

$$\Phi_i(x_j) = [f(x_1), f(x_2), \dots f(x_j)] \quad (1)$$

При построении графиков статистической плотности распределения для значений площадей КГО (s), нормированных на количество подледниковых озер (n_{oz}), которые могут быть обозначены как величина (s^*):

$$s^* = [(s/10^3)/n_{oz}] \text{ (км}^2\text{)}, \quad (2)$$

Проведенный вероятностно-статистический анализ распределения подледниковых озер, расположенных в пределах выделенных КГО на территории Антарктиды показал, что значения площадей (s) занимаемых теми или иными КГО, нормированных на количество озер (n_{oz}) в этих КГО, можно представить в виде статистической плотности распределения $p_c(m, L)$ значений (s^*), приведенной к уровню значений теоретической плотности распределения Пуассона $p(m, L)$ [18] для восточной континентальной (рис. 11А) и западной рифтогенной (рис. 11Б) частей Антарктиды по формуле 3 (или по значениям соответствующих таблиц [18]).

$$p(m, L) = (L^m / m!) \times \exp(-L), \quad (3)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots, m_{\max}$ – максимальное количество значений по горизонтальной оси графиков статистических плотностей распределения Пуассона рассчитываются согласно [18] как корень квадратный ($m_{\max} = \sqrt{j}$) из количества анализируемых значений $s^*(j)$ отдельно для восточной ($m_{\max} = \sqrt{32} \approx 6$) и западной ($m_{\max} = \sqrt{16} \approx 4$) частей Антарктиды. При этом ширина диапазона Δs^* для значений $s^*(j)$ на территории Антарктиды для каждого ($m = 1, 2, 3, \dots, m_{\max}$) рассчитывался согласно [18] как:

$$\Delta s^* = [s^*_{\max} - s^*_{\min}] / m_{\max} = (0 - 242) / 6 \approx 40 \text{ (км}^2\text{)} \text{ для восточной части Антарктиды} \quad (4a)$$

$$\Delta s^* = [s^*_{\max} - s^*_{\min}] / m_{\max} = (0 - 242) / 4 \approx 60 \text{ (км}^2\text{)} \text{ для западной части Антарктиды} \quad (46)$$

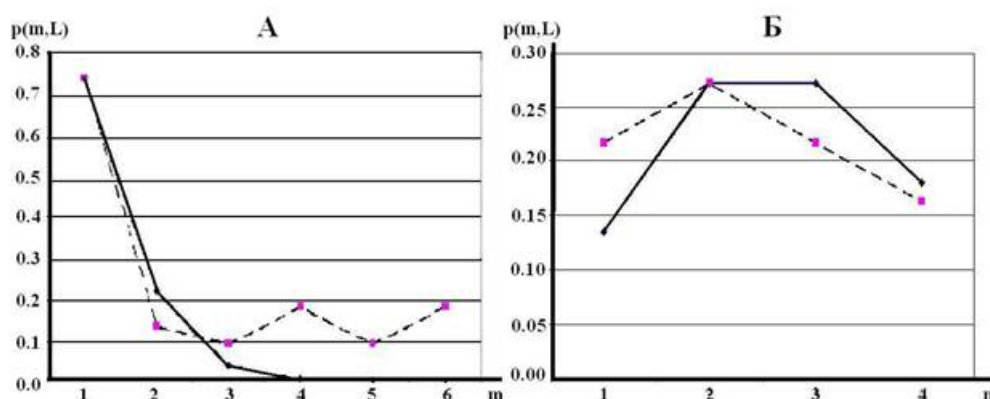


Рис. 11. А – графики статистической плотности распределения $p_c(m, L)$ значений площадей (s) занимаемых исследуемыми КГО, нормированных на количество озер (n_{oz}) в

этих КГО, расположенных на территории восточной (платформенной) части Антарктиды (пунктирная линия) и графики теоретической плотности распределения Пуассона $p(m, L)$ при $L = 0.3$ (сплошная линия) [18]. На графиках статистической плотности распределения $p_c(m, L)$ значений площадей (s^*) занимаемых исследуемыми КГО, нормированных на количество озер ($n_{оз}$) в этих КГО в Восточной Антарктиде значение $m = 1$ соответствует значениям $\Delta s_1^* = 0-40$ (км²); $m = 2$ соответствует значениям $\Delta s_2^* = 41-80$ (км²); $m = 3$ соответствует значениям $\Delta s_3^* = 81-120$ (км²); $m = 4$ соответствует значениям $\Delta s_4^* = 121-160$ (км²); $m = 5$ соответствует значениям $\Delta s_5^* = 161-200$ (км²); $m = 6$ соответствует значениям $\Delta s_6^* = 201-240$ (км²); Б – графики статистической плотности распределения $p_c(m, L)$ значений площадей (s) занимаемых исследуемыми КГО, нормированных на количество озер ($n_{оз}$) в этих КГО, расположенных на территории западной (рифтогенной) части Антарктиды (пунктирная линия) и графики теоретической плотности распределения Пуассона $p(m, L)$ при $L = 2.0$ (сплошная линия). На графиках статистической плотности распределения значений площадей (s^*) занимаемых исследуемыми КГО, нормированных на количество озер ($n_{оз}$) в этих КГО в Западной Антарктиде значение $m = 1$ соответствует значениям $\Delta s_1^* = 0-60$ (км²); $m = 2$ соответствует значениям $\Delta s_2^* = 61-120$ (км²); $m = 3$ соответствует значениям $\Delta s_3^* = 121-180$ (км²); $m = 4$ соответствует значениям $\Delta s^* = 181-240$ (км²).

Графики статистической плотности распределения, представленные на рис. 11 показывают, что значения площадей КГО (s^*), нормированных на количество подледниковых озер ($n_{оз}$), расположенных в пределах большинства из $j = 48$ исследуемых КГО на территории восточной (рис. 11А) и западной (рис. 11Б) частей Антарктиды может быть описано законом распределения Пуассона, согласно [18]. Затем по таблицам для расчета суммарных вероятностей для распределения Пуассона [18] были определены значения вероятностей $P(s^*)$ для каждой КГО, расположенной в пределах восточной и западной частей Антарктиды, которые представлены ниже в таблице.

По результатам проведенного автором вероятностно-статистического анализа значений аномалий теплового потока (АТП), проанализированных в пределах $j = 48$ исследуемых КГО, как для восточной (платформенной), так и для западной (рифтогенной) частей территории Антарктиды, были построены статистические гистограммы, которые представлены на рис. 12 А,Б.

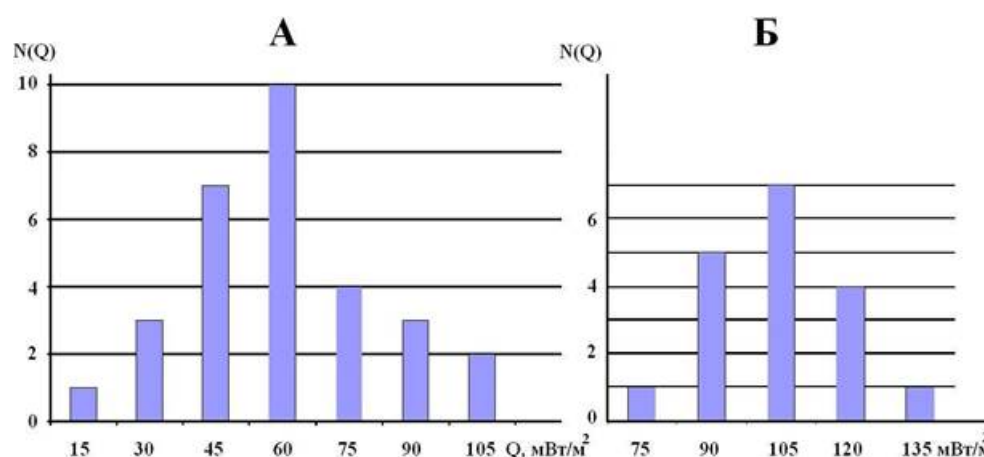


Рис. 12. А - графики статистических гистограмм $N(Q)$ значений теплового потока (Q),

расположенных в пределах КГО на территории восточной (платформенной) части Антарктиды; Б – графики статистических гистограмм $N(Q)$ значений теплового потока (Q), расположенных в пределах КГО на территории западной (рифтогенной) части Антарктиды.

Гистограмма, также как и понятие классической вероятности, описывает распределение частот $N(\Phi_j) = (k/j)$, определяемых для каждого из j - общего количества значений (Φ_j) ряда случайных величин определенного вида геофизических данных [18]. Статистическая гистограмма распределения значений АТП в пределах расположения КГО на территории восточной (платформенной) части Антарктиды (рис. 12А) имеет максимальное значение, которое соответствует $Q = 60$ мВт/м². Гистограмма АТП для восточной (платформенной) части Антарктиды по своим значениям близка к значениям среднестатистической гистограммы, построенной по данным всех континентальных регионов Земли в целом ($Q = 45-60$ мВт/м²), приведенной в работе [3]. В правой части этого рисунка (рис. 12Б) изображена гистограмма АТП для западной (рифтогенной) части Антарктиды с максимумом гистограммы, который соответствует значениям $Q = 105$ мВт/м². При этом в рифтогенных районах Земли (например, Калифорния), где отмечена повышенная дегазация геофлюидов различного химического состава из недр (радон, углерод) [17] и выявлены месторождения углеводородов, значения АТП в рифтогенных зонах ($Q = 60-150$ мВт/м²) в зависимости от региона [5, с. 70, рис. 33]; [3, с.220, рис. 6.5в], как правило, значительно выше значений АТП для нефтегазоносных областей (НГО) в платформенных (слабоперспективных) регионах РФ ($Q = 60$ мВт/м²). Аналогичная разница в значениях АТП наблюдается для регионов в западной и восточной частях Антарктиды. По данным гистограмм для значений АТП на территории Антарктиды (рис. 12) были построены графики соответствующих плотностей распределения (рис. 13).

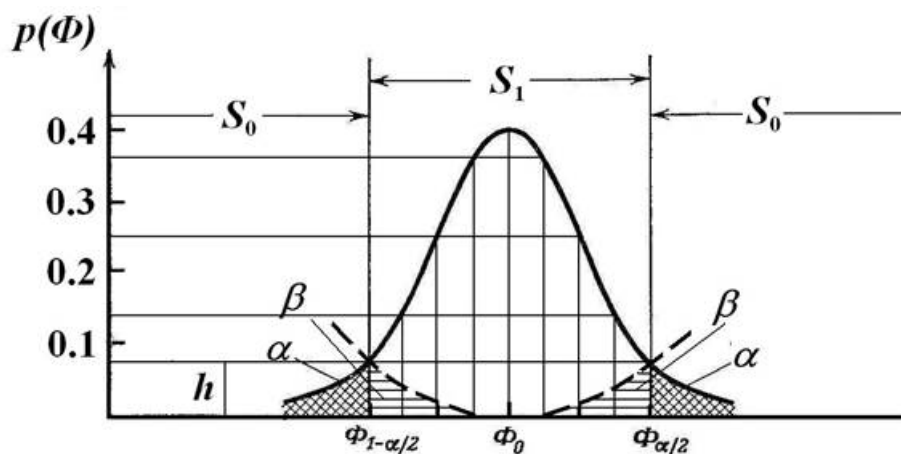


Рис. 13. Графики кривых плотностей распределения $p(\Phi_i)$ соответствующих закону нормального распределения Гаусса (для нормально (S_1) и аномально (S_0) распределенных значений) [18], характерных для значений мощности земной коры (H_K) и теплового потока (Q), определенные для западной и восточной частей Антарктиды.

Проверка показала, что графики плотности распределения таких геолого-геофизических данных (ГГД) (H_K , Q) для территории Восточной и Западной Антарктиды соответствуют закону нормального распределения Гаусса (рис. 13). Учитывая, что проанализированные ГГД о плотности распределения мощности земной коры (H_K) и аномалий теплового потока (Q) на территории Антарктиды, а также полученные ранее

ГГД, в пределах НГО РФ в континентальных и переходных (субокеанических) регионах (где $H_k = 27 \pm 18$ км; $Q = 105 \pm 45$) [16], подчиняющихся закону нормального распределения Гаусса, то данные для плотностей распределения в НГО РФ были использованы как эталонные при расчетах вероятностей для каждой исследуемой КГО на территории Антарктиды для гипотез наличия полезной «аномалии» $p(\Phi_i/H_1)$ и ее отсутствия $p(\Phi_i/H_0)$.

Из данных, приведенных на рис. 13 можно видеть, что на графике теоретической плотности распределения Гаусса $p(\Phi_i/H_1)$ существуют две области (α , β), связанные с ошибками I и II рода. Вероятность ошибки I рода, обнаружения ложной аномалии (α) определяется следующим интегральным выражением:

$$\alpha = \int p(\Phi_i/H_0) d\Omega(\Phi_i), \quad (5)$$

где $d\Omega(\Phi_i)$ – n -мерное пространство выборки анализируемых значений ГГД.

Вероятность ошибки II рода, пропуска действительной аномалии (β) определяется следующим интегральным выражением:

$$\beta = \int p(\Phi_i/H_1) d\Omega(\Phi_i) \quad (6)$$

По данным, представленным на графиках теоретических плотностей распределения исследуемых видов ГГД, собранных в пределах территорий занимаемых НГО РФ были определены значения вероятностей $P_a(\Phi_i/H_1)$, $P_a(\Phi_i/H_0)$. В результате, подсчета значений этих вероятностных параметров (α , β), зафиксированных в зонах пересечения кривых плотностей распределения было определено значение среднего риска принятия решения по формуле:

$$r(h) = C_\alpha \times P_a(\Phi_i/H_0) \times \alpha + C_\beta \times P_a(\Phi_i/H_1) \times \beta, \quad (7)$$

где $P_a(\Phi_i/H_1)$, $P_a(\Phi_i/H_0)$ - называются априорными вероятностями гипотез наличия H_1 и отсутствия H_0 полезной аномалии; C_α и C_β - цены ошибок I и II рода.

Используя эти данные определялись значения порога (h) принятия, разделяющего пространство $d\Omega(\Phi)$ значений используемого вида ГГД на две области S_1 и S_0 условной плотности распределения $p(\Phi_i/H_1)$ и $p(\Phi_i/H_0)$. Минимизация среднего риска по критерию Байеса привела к определению значения порога принятия решения равному:

$$h = [C_\alpha \times P_a(\Phi_i/H_0)] / [C_\beta \times P_a(\Phi_i/H_1)], \quad (8)$$

Далее, по каждому виду ГГД на территории Антарктиды в пределах каждой из $j=48$ анализируемых КГО, по радиальным направлениям КГО определялось среднее значение каждого вида ГГД. Затем для этого среднего значения ГГД, полученного в пределах каждой КГО, на основании сравнения с графиком теоретической плотности распределения [18], проводился расчет коэффициента правдоподобия (Λ) для каждой исследуемой КГО по следующей формуле [18]:

$$\Lambda(\Phi_i) = [p(\Phi_i/H_1) / p(\Phi_i/H_0)] \quad (9)$$

Затем для каждой исследуемой КГО проводилась сравнение рассчитанного порогового значения (h), определенного по каждому виду ГГД на территории НГБ, с коэффициентом

правдоподобия (Λ). Если значения коэффициента правдоподобия (Λ) для исследуемой КГО было выше порогового значения (h) исследуемого вида ГГД, то принималось решение о гипотезе наличия (H_1) аномалии этого вида ГГД, в противном случае – решение о гипотезе ее отсутствия (H_0) в пределах этой КГО. Если значение коэффициента правдоподобия (Λ) для исследуемой КГО было выше порогового значения (h), то тогда уже по значениям теоретической плотности распределения $p(\Phi_i/H_1)$ рассчитывалось значение вероятности $P(\Phi_i/H_1)$ для исследуемой КГО по каждому виду ГГД. Для этого использовался график одномерной теоретической плотности распределения $p(\Phi_i/H_1)$, расположенный в области S_1 .

Известно, что одномерная теоретическая плотность распределения $p(\Phi_i/H_1)$ случайного процесса определяет вероятность того, что значения этого процесса в произвольный момент (x) расположения на профиле измерений будут заключены в определенном интервале ($\Delta\Phi_i$) и при этом значения вероятности $P(\Phi_i/H_1)$ и теоретической плотности распределения $p(\Phi_i/H_1)$ случайного процесса, могут быть представлены в виде следующей формулы [18]:

$$P(\Phi_i/H_1)\{\Phi_i < [\Phi_i(x)/H_1] < \Phi_i + \Delta\Phi_i\} \approx p(\Phi_i/H_1) \times \Delta\Phi_i \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что вероятность $P(\Phi_i/H_1)$ наличия определенного события (аномалии ГГД) (Φ_i) с точностью до величины этого интервала ($\Delta\Phi_i$) будет соответствовать значению теоретической плотности распределения $p(\Phi_i/H_1)$ случайного процесса. Затем, на основании вышеизложенных методов обработки данных, был произведен расчет вероятностей по трем исследуемым видам ГГД (H_K , Q , s^*) в пределах каждой из 48 исследуемых КГО на территории Антарктиды. Для получения окончательного результата проведенных исследований по вероятностям всех трех видов используемых ГГД $P(\Phi_i)$ ($i = 1, 2, 3$ – номер определенного вида ГГД) производилась оценка среднестатистического значения вероятности $P_{cp}(\Phi)$ в пределах каждой из 48 исследуемых КГО. Кроме того, можно считать, что для вычисления вероятностей всех исследуемых видов ГГД (H_K , Q , s^*) используют статистически независимые ГГД. При этом, выявление одного из статистических событий не изменяет вероятности появления других статистических событий по другому виду ГГД. Для статистически независимых событий были рассчитаны среднестатистического значения вероятности $P_{cp}(\Phi)$ по формуле:

$$P_{cp}(\Phi_i) = [P_1(H_K) + P_2(Q) + P_3(s^*)] / 3, \quad (11)$$

где $P(\Phi_i)$ вероятности, рассчитанные по соответствующим значениям ГГД в пределах месторасположения каждой КГО на территории Антарктиды. $P_1(H_K)$ – значения вероятности, определяемое по данным (H_K) мощности земной коры; $P_2(Q)$ – значения вероятности, определяемое по данным значений аномалий теплового потока (Q); $P_3(s^*)$ – значения вероятности, определяемое по данным (s^*) площади КГО, нормированной на плотность подледниковых озер.

Результаты исследований

Полученные статистические результаты были использованы автором для прогноза потенциальных углеводород-перспективных концентрических геоморфологических особенностей (КГО), расположенных на территории Антарктиды. Это дало возможность, с

небольшими финансово-экономическими затратами, выделить углеводород-перспективные области, проявляющиеся как в геоморфологических особенностях поверхности ледников и рельефа поверхности земной коры Антарктиды. Для прогноза углеводородной перспективности КГО на территории Антарктиды предлагается использовать элементы теории вероятности [18]. Используя информационно-вероятностную методику прогнозирования месторасположения углеводород-перспективных КГО, изложенную в [18], была рассчитана таблица вероятностей, используемых для выделения углеводород-перспективных КГО на территории Антарктиды (табл. 1).

Таблица 1. Таблица вероятностей, используемых для выделения углеводород-перспективных КГО на территории Антарктиды

j	Ин-дексКГО	Название КГО	$H_{\text{км}}$	$P_1(H_{\text{км}})\%$	$Q_{\text{км}}$	$P_2(Q)\%$	$2 \times r_{\text{км}}$	n	$s^*, \text{км}^2$	$P_3(s)\%$	$P_{\text{ср}}\%$
		Восточн. Антарктида									
1	1a	Квин-Модская	45	>1	45	4	555	0	242	-	2
2	1b	Мауд-Лэндская	45	>1	45	4	555	0	242	-	2
3	1c	Карпинская	45	>1	45	4	278	0	242	-	2
4	1d	Бельжикская	50	>1	75	90	333	4	22	52	48
5	1e	Домефская	45	>1	75	90	444	6	26	44	45
6	1f	Фаравейская	38	4	60	33	278	12	5	87	41
7	1g	Котсовская	45	>1	60	33	333	0	29	-	11
8	2a	Принц-Чарльзская	35	22	105	99	333	3	29	37	52
9	2b	Щунинская	35	22	45	4	333	1	87	2	9
10	2c	Кемпская	27	99	45	4	444	0	155	-	35
11	2d	Эндербиевская	38	4	90	75	666	2	174	>1	26
12	2f	Ламберт-Рифтская	27	99	105	99	222	0	38	-	67
13	3	Советская	45	>1	60	33	888	4	155	>1	11
14	4a	Короткевичская	35	22	60	33	999	3	241	>1	18
15	4b	Моусонская	33	45	105	99	444	1	155	>1	49
16	4c	Максимовская	27	99	90	75	389	0	119	-	58
17	5	Восточно-Озерская	40	2	60	33	555	20	12	73	36
18	6a	Гамбурцевская	40	2	15	>1	666	2	174	>1	1
19	6b	Александровская	40	2	60	33	444	13	11	75	37
20	7	Голицинская	27	99	90	75	777	2	237	>1	58
21	8a	Шмидтовская	35	22	60	33	999	5	156	>1	18
22	8b	Уилксовская	35	22	75	90	444	3	52	14	41
23	9a	Конкорд-Озерская	40	2	60	33	666	38	9	79	38
24	9b	Керк-Патрикская	35	22	60	33	444	20	8	82	45
25	10a	Аделиевская	27	99	45	4	333	2	44	19	41
26	10b	Шеклтонская	35	22	30	>1	333	13	7	84	35

26	10b	Шектопская	35	22	30	>1	666	16	22	52	24
27	10c	Георг-Лэндская	35	22	30	>1	666	16	22	52	24
28	16	Южно-Полюсная	40	2	60	33	555	18	13	71	35
29	21a	Бельгранская	35	22	30	>1	777	20	24	48	23
30	21b	Енсакольская	40	2	45	4	333	13	149	84	30
31	21c	Северо-Бельгранская	35	22	30	>1	388	4	30	35	19
32	21d	Западно-Бельгранская	30	88	75	90	222	0	39	-	59
		Средн. значения $P(\Phi_j)$		36		39				39	32
		Запад. Антарктида									
33	11a	Росса-Ледниковая	32	60	75	>1	777	2	75	79	46
34	11b	Сидли-Горская	33	45	105	99	555	1	241	13	53
35	11c	Терра-Бэрдская	35	22	105	99	444	1	155	43	55
36	11d	Эребусская	27	99	120	1	222	1	39	91	64
37	12	Мэри-Бэрдская	35	22	120	1	777	30	5	99	41
38	13	Бэрдская	38	5	105	99	444	1	155	43	49
39	14	Северо-Бэрдская	35	22	120	1	555	2	121	59	27
40	15	Амундсенская	30	88	105	99	333	1	84	76	88
41	17a	Сайплская	25	72	90	1	444	1	155	43	39
42	17b	Элсуортская	27	99	75	>1	777	2	237	14	38
43	18a	Беллинсгаузенская	35	22	105	99	999	0	783	-	41
44	19a	Северо-Уэддэлская	18	5	120	1	444	?	155	?	3
45	20a	Фильхнерская	27	99	90	1	555	?	241	?	51
46	20b	Ронневская	30	88	90	1	333	?	87	?	45
47	20c	Винсонская	30	88	75	>1	333	4	22	95	61
48	22a	Скоша-Лэндская	30	88	105	99	333	7	12	98	95
		Средн. значения $P(\Phi_j)$		58		38				63	50

Выводы

В результате проведенных исследований впервые были определены географические координаты расположения, пространственные размеры (диаметры) и значения вероятностей для сорока восьми КГО на территории восточной (материковой) и западной (рифтогенной) частей Антарктиды. Проведенные исследования показали, что наиболее углеводород-перспективными КГО на территории Западной и Восточной Антарктиды являются КГО с аномально высокими значениями АТП. С геологической точки зрения, для поисково-разведочных исследований на территории Антарктиды они являются наиболее углеводород-перспективными КГО при должной оценке и других геофизических параметров. В результате проведенных расчетов также выяснилось, что для поисков месторождений ПУВ, которые частично возникают за счет дегазации и

дегидратации мантии Антарктиды в зонах мантийных плюмажей, углеводород-перспективными являются КГО, которые имеют высокие значения такого геофизического параметра (s^*) как площадь КГО нормированная на плотность географического распределения подледниковых озер. Возможно, уже в настоящее время необходимо при закладке новых антарктических станций России выбирать наиболее углеводород-перспективные КГО для проведения детальных наземных геолого-геофизических исследований для поиска месторождений нефти и газа на территории Антарктиды. Из 32-х исследуемых КГО, расположенных в восточной (континентальной) части Антарктиды, пять КГО (Принц-Чарльзская, Ламберт-Рифская, Максимовская, Голицинская, Западно-Бельгранская) имели значение вероятности выше $P_{cp} > 50\%$ (см. табл.). Другие 14 имели значение вероятности выше средней ($P_{cp} > 32\%$) по этому региону. Автор предполагает, что 5 выше перечисленных КГО имеют высокие перспективы для открытия в пределах этих КГО месторождений углеводородов. Другие 14 исследуемых КГО должны быть исследованы более тщательно, так как могут быть УВ-перспективными только в отдельных районах. Еще более УВ-перспективными являются семь КГО (Сидли-Горская, Терра-Бэрдская, Эребусская, Амундсенская, Фильхнерская, Винсонская, Скоша-Лэндская) в западной части Антарктиды со значениями вероятности выше $P_{cp} > 50\%$.

Благодарности

Автор статьи искренне благодарит докторов геолого-минералогических наук Тимурзиева А.И., Сейфуль-Мулюкова Р.Б., Сывороткина В.Л. - организаторов ежегодных Всероссийских конференций «Кудрявцевские чтения» за их огромную работу по организации этих конференций и за возможность проанализировать замечания, поступившие при изложении докладов и устранить их в рамках данной статьи.

Библиография

1. Атлас космических снимков "Земля из космоса". Главное управление геодезии и картографии СССР. Государственный научно-исследовательский и производственный центр "Природа". 1985. 300 с.
2. Богоявленский И.В., Богоявленский В.И. Дегазация Земли. Формирование залежей углеводорода в верхней части разреза и кратеров выбросов газа // Деловой журнал "Neftegaz.Ru". 2021. № 1. С. 48-55.
3. Ботт М. Внутреннее строение Земли. М.: Мир, 1974. 373 с.
4. Васильчук Ю.К., Белик А.Д., Буданцева Н.А., Геннадиев А.Н., Васильчук А.К., Васильчук Дж.Ю., Завгородняя Ю.А., Гинзбург А.П., Блудушкина А.Б. Полициклические ароматические углеводороды и изотопы углерода в торфе миграционного бугра пучения (Большеземельская тундра) // Почвоведение. 2021. № 7. С. 797-805. DOI: 10.31857/S0032180X21070133 EDN: MZJTLF.
5. Деменицкая Р.М. Кора и мантия Земли. М.: Недра, 1975. 253 с.
6. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Сулиди-Кондратьев Е.Д. Кольцевые структуры лика планеты. М.: Знание, 1989. 48 с.
7. Коган А.А. Глубинное сейсмическое зондирование земной коры в Восточной Антарктиде // Сб. "Антарктика", вып. 13. М.: Наука, 1974. С. 85-104.
8. Корякин Е.Д. Строение земной коры моря и дуги Скоша по геофизическим данным // Сб. "Антарктика", вып. 12. М.: Наука, 1973. С. 30-57.
9. Кузякин Л.П., Белова Н.Г., Васильчук Ю.К. и др. Метан в пластовых льдах Восточной Камчатки, как индикатор их генезиса // Лед и снег. 2024. Т. 64. № 3. С. 447-463. DOI: 10.31857/S2076673424030106 EDN: INGZDK.
10. Равич М.Г., Каменев Е.Н. Кристаллический фундамент Антарктической платформы.

Л.: Гидрометеиздат, 1972. 150 с.

11. Строев П.А. Мощность и некоторые черты строения земной коры в Южном океане и в прибрежной зоне Антарктиды // Сб. "Антарктика", вып. 12. М.: Наука, 1973. С. 42-59.

12. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М.: Геоинформцентр, 2002. 250 с.

13. Тектоническая карта Антарктиды. Масштаб 1:40 000 000. Под ред. Равич М.Г., Грикуров Г.Э. Л.: НИИГА, 1976. 1 л.

14. Тимурзиев А.И. Миф "энергетического голода" от Хабберта и пути воспроизводства ресурсной базы России на основе реализации проекта "Глубинная нефть" // Бурение и нефть. 2019. № 1. С. 12-20. EDN: YZHFNJ.

15. Фролов А.И., Строев П.А., Корякин Е.Д. Гравитационное поле и строение земной коры земли Уилкса и земли Виктории (Восточная Антарктида) // Сб. "Морские гравиметрические исследования", вып. 6. М.: МГУ, 1970. С. 104-113.

16. Харитонов А.Л. Прогнозирование углеводородоперспективных структур кольцевого вида в Баренцевоморском регионе по результатам применения стохастического метода при использовании совокупности геопараметров // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2024. Т. 24. № 2. С. 130-137. DOI: 10.18500/1819-7663-2024-24-2-130-138 EDN: ORAMII.

17. Харитонов А.Л., Харитонova Г.П., Трюонг К.Х. Сопоставление спутниковых геомагнитных данных с наземным измерением концентрации радона для выявления предвестников землетрясений (на примере Калифорнийского сейсмоактивного района) // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2009. № 13. С. 170-177. EDN: KTZTBF.

18. Bendat J.S., Pierol A.G. Random data: analysis and measurement procedures. New York: Wiley-Interscience, 1972. 464 p.

19. Bentley C.R. Crustal structure of Antarctic // Tectonophysic. 1973. Vol. 20. N 1-4. P. 229-240.

20. Ebbing J. и др. Earth tectonics as seen by GOCE - enhanced satellite gravity gradient imaging // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. N 1. P. DOI: 10.1038/s41598-018-34733-9 EDN: AWYWZM.

21. Henricson S.W. National Geodetic Satellite Program. NASA, 1977.

22. IHFC. Global Heat Flow Database of the International Heat Flow Commission, 2012.

23. Langel R.A. и др. MAGSAT data processing: a report for investigators // Technical memorandum 82160: NASA, 1981. 329 p.

24. LANDSAT.usgp.gov/documents/DFCB_Vol_IV.L.pdf. Ebook LANDSAT 7 SYSTEM.

25. Li L., Aitken A.R.A. Crustal heterogeneity of Antarctica signals spatially variable radiogenic heat production // Geophysical Research Letter. 2024. Vol. 51. N 2. DOI: 10.1029/2023GL106201 EDN: EFIPQI.

26. Lloyd A.J. и др. Seismic structure of the Antarctic upper mantle imaged with adjoint tomography // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2020. Vol. 125. N 3. DOI: 10.1029/2019JB017823 EDN: UZPPQH.

27. Reading A.M. и др. Antarctic geothermal heat flow and its implications for tectonics and ice sheets // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Vol. 3. N 12. P. 814-831. DOI: 10.1038/s43017-022-00348-y EDN: PSPYLZ.

28. Risk G.F., Hochstein M.P. Heat flow at arrival heights, Ross Island, Antarctica, New Zealand // Journal of Glaciology. 1974. Vol. 46. N 155. P. 665-674. <https://doi.org/10.3189/172756500781832701>.

29. Seroussi H. и др. InitMIP-Antarctica: an ice sheet model initialization experiment of ISMIP6 // The cryosphere. 2019. N 13. P. 1441-1471. DOI: 10.5194/tc-13-1441-2019 EDN: XNQGDK.

30. Shen W. и др. A geothermal heat flux map of Antarctica empirically constrained by seismic structure // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47. N 14. DOI:

10.1029/2020GL086955 EDN: LOUZMC.

31. Steinberger B., Steinberger A. Mantle plumes and their interactions // Dynamics of Plate Tectonics and mantle convection. 2023. P. 407-426. DOI: 10.1016/B978-0-323-85733-8.00021-4.

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Предметом исследования является изучение углеводород-перспективных областей Антарктики по геофизическим данным, измеренным в пределах концентрических геоморфологических особенностей земной коры и ледникового покрова.

Тема исследований актуальна. Территория Антарктики остается одним из самых больших по занимаемой площади, но слабоизученных континентов южного полушария Земли. По прогнозам некоторых экспертов недра Антарктики содержат огромное количество разнообразных природных ресурсов. Однако, глубинное строение земной коры на территории Антарктиды долгое время оставалось слабоизученным с помощью наземных геолого-геофизических методов из-за суровых погодных условий и сложностей исследования земной коры из-за мощного слоя ледников, покрывающих большую часть этого континента. Все это до последнего времени не позволяло найти месторождения полезных ископаемых на территории Антарктиды. Зоны повышенного теплового потока и наличие впадин в рельефе кристаллического фундамента часто создают концентрические геоморфологические особенности (КГО) в виде ледниковых концентрических депрессий. Эти локальные КГО возникли в результате таяния слоев вечной мерзлоты, вследствие общего повышения средней по планете температуры приземной атмосферы. КГО по своей геоморфологической структуре очень похожи на локальные, связанные с выбросами газообразных углеводородов. В связи с этим, изучение данного вопроса весьма актуально.

Методология исследования основана на применении основных геофизических методов (гравиразведка, космомагниторазведка, геотермия, сейсморазведка), так и вспомогательных геоморфологических методов (спутниковые геодезические методы определения высот рельефа ледниковой и подледниковой поверхности, а также спутниковые радарные методы просвечивания ледникового покрова).

Научная новизна исследований в статье заключается в том, что впервые сделана попытка с помощью спутниковых геофизических съемок изучить глубинное строение Антарктиды, скрытое под мощным 4-х километровым ледниковым покровом. Оптические спутниковые космофотосъемки позволили выделить крупные (диаметром 200-1000 км) концентрические геоморфологические особенности, наблюдаемые в рельефе ледникового покрова Антарктиды. По данным сейсмотомографии автором были выделены новые КГО: Щунинская, Уилксовская, Восточно-Озерская, Беллинсгаузенская, сформировавшиеся в разрезе земной коры Антарктиды и морей, расположенных вокруг Антарктиды.

Стиль статьи – научный. Научный материал обогащен достаточным количеством расчетных данных, иллюстрирован картографическим материалом. Объем статьи выдержан. Структура статьи соответствует требованиям журнала. По мнению рецензента, расчетные данные приведенные в разделе "Методика исследований" вполне можно отнести в раздел "Результаты исследований". Также необходимо озаглавить таблицу 1,

представленную в тексте.

В результате проведенных исследований, автором установлено, что среднее значение вертикальной мощности земной коры (Нк) в восточной (платформенной) части Антарктиды составляет около 40 км, а в ее западной (палеорифтовой) части около 30 км. Но в восточной части Антарктиды имеются определенные области, где мощность земной коры не превышает 30 км. Аналогичные области с небольшой мощностью земной коры характерны для нефтегазоносных областей Западной Сибири и Ямала. Автором доказано, что на территории Антарктиды, существует несколько КГО с высокими и очень высокими значениями плотности распределения подледниковых озер. Полученные статистические результаты были использованы автором для прогноза потенциальных углеводород-перспективных концентрических геоморфологических особенностей, расположенных на территории Антарктиды. Это дало возможность выделить углеводород-перспективные области поверхности земной коры Антарктиды.

Библиография статьи включает в себя 31 литературный источник, в том числе 14 - на иностранном языке. Апелляция к оппонентам представлена в ссылках на библиографические источники.

Выводы в статье обоснованы и отражают результаты проведенных исследований. Автором установлено, что углеводород-перспективных являются семь КГО: Сидли-Горская, Терра-Бэрдская, Эребусская, Амундсенская, Фильхнерская, Винсонская и Скоша-Лэндская в западной части Антарктиды со значениями вероятности выше $P_{ср} > 50\%$. Исходя из теоретических предпосылок, чем больше на территории Антарктиды будет найдено источников гидротермальной или газотермальной (дегазационной) деятельности недр, тем выше вероятность нахождения в этих КГО залежей углеводородов. Автором выявлены крупные линзы жидкости (подледниковые озера), которые могут содержать в составе подледниковой озерной жидкости значительное количество жидких углеводородов или природного газоконденсата.

Данная статья будет полезна широкому кругу ученых и может быть опубликована в журнале «Арктика и Антарктика». Существенных замечаний по статье не отмечено.

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Галкин А.Ф., Жирков А.Ф., Панков В.Ю. Ошибки линеаризации зависимости коэффициента теплопроводности снега от плотности // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.74710 EDN: RJJDIG URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74710

Ошибки линеаризации зависимости коэффициента теплопроводности снега от плотности

Галкин Александр Фёдорович

ORCID: 0000-0002-5924-876X

доктор технических наук

Главный научный сотрудник; Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36, ИМЗ СО РАН. Лаборатория геотермии криолитозоны

✉ afgalkin@yandex.ru



Жирков Александр Федотович

кандидат технических наук

Ведущий научный сотрудник; лаборатория геотермии криолитозоны; Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

677010, Россия, респ. Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36

✉ zhirkov_af@mail.ru



Панков Владимир Юрьевич

кандидат геолого-минералогических наук

доцент, кафедра Строительства дорог и аэродромов; Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

677027, Россия, республика Саха(Якутия), г. Якутск, ул. Белинского, 58

✉ pankov1956@gmail.ru



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

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.2.74710

EDN:

RJJDIG

Дата направления статьи в редакцию:

05-06-2025

Аннотация: Предметом исследований является функциональная зависимость коэффициента теплопроводности снега от его плотности. Объектом исследований являлась линеаризация функции, выраженной полиномом произвольной степени, характерной для количественной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега. Особое внимание уделено анализу ошибок, возникающих при замене полиномиальной функции линейной. Выполнен анализ существующих функциональных зависимостей коэффициента теплопроводности от плотности снега, которая является интегральным показателем сложных тепло- и массообменных процессов, происходящих при метаморфизме снежного покрова. В результате анализа основных расчетных формул для прогноза коэффициента теплопроводности от плотности снега все зависимости условно разделены на две группы: линейные и нелинейные (выраженные полиномами второй, третьей и четвертой степени). Для поиска точки, соответствующей максимальному значению ошибки линеаризации второй группы методов, построена и исследована соответствующая целевая функция в наиболее общем виде. При построении функции, определяющей возникающую при линеаризации абсолютную ошибку, в качестве исходных формул принят обобщающий полином производной степени, которым описываются известные экспериментальные и теоретические зависимости коэффициента теплопроводности снега от плотности. Полученная функция исследована на максимум классическим способом дифференцирования исходной зависимости по аргументу. Научная новизна заключается в том, что впервые получена зависимость между ошибкой, возникающей между линейным и нелинейным способом представления экспериментальных аппроксимирующих зависимостей коэффициента теплопроводности снега и плотности снега. Показано, что при линеаризации квадратичной зависимости (формулы Абельса, Кондратьевой, Брэхта, Штурма и др.) максимальная абсолютная ошибка находится в середине интервала усреднения. При этом значение её равно значению исходной функции в этой точке. С увеличением показателя степени максимальная ошибка смещается к верхней границе участка линеаризации, и изменяется, например для кубического полинома (формула Ван Дуссена) до значения, равного 0,58 величены диапазона линеаризации. А, для полинома четвертой степени (формула Янсона) до 0,63 величены диапазона. При снижении показателя степени меньше двух, (формула Йена, Швандера), наоборот, максимальная ошибка линеаризации смещается от середины интервала к нижней границе.

Ключевые слова:

снег, свойства, плотность, теплопроводность, коэффициент, формула, линеаризация, прогноз, ошибка, точность определения

Работа выполнена по государственному заданию по теме «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика» (№ 22011800062-5).

Введение

Исследованию физических свойств снега уделяется большое внимание в научном и инженерном сообществе. Снеговедение выделено в отдельный раздел науки гляциологии. Это объясняется важной ролью снежного покрова в формировании климата криолитозоны [\[1,2,3\]](#) и его ролью в урожайности сельскохозяйственных культур [\[4,5,6\]](#), а

также использовании в транспортной инфраструктуре Севера при возведении автозимников и ледовых переправ [7,8,9]. Особенностью снега является способность существенно изменять свои свойства в зависимости от температурного режима и времени. В справочной литературе [10] приведена классификация, включающая основные виды снега, физические свойства которых, например плотность, изменяется кратно при переходе от одного вида к другому. Одним из главных параметров снега является его теплопроводность, которая, по мнению большинства исследователей, может быть определена, как функция плотности. В то же время, известно, что в действительности, коэффициент теплопроводности снега (в отличие от твердых тел, для которых он собственно и вводился основоположном теории теплопроводности Фурье) является комплексной величиной, определяемой не только теплопроводностью, но и процессами тепло и массообмена, сопровождающиеся фазовыми переходами (испарения, плавления, конденсации) [11,12,3]. Этими же процессами объясняется и метаморфизм снежного покрова, где на одном и том же участке в вертикальном разрезе могут быть слои от свежеснежного (так называемого нового снега) до фирна или пузырчатого льда, физические свойства которых сильно различаются [14,15,16]. Поэтому часто коэффициент теплопроводности снега называют «эффективный коэффициент теплопроводности», подчеркивая его особенность. Одной из первых работ по определению коэффициента теплопроводности снега, является работа Г. Абельса [17], который предложил простую формулу для определения коэффициента теплопроводности снега как функции его плотности. В дальнейшем было получено множество подобных зависимостей, обзор которых и сравнительный анализ содержится, например, в следующих работах [11,18,19,20]. Знакомство с обзорными работами показало, что большинство формул с математической точки зрения, можно разделить на две части: в одной зависимость коэффициента теплопроводности снега от плотности считается линейной, например [21,22,23], а в другой нелинейной, например [17,24,25,26]. Как правило, в виде полного или усеченного полинома 2-3 (или, даже 4 – формула Янсона [26,27]) степени. Наиболее часто используется полином второй степени [11,18]. То есть, считается, что зависимость между теплопроводностью снега и его плотностью квадратичная. Причем, известно, что все нелинейные зависимости можно на отдельных интервалах изменения плотности линеаризовать. Найдя компромисс между формулами первой и второй группы, без особой потери в точности [18,23].

Целью работы было сравнение расчетных линейных и нелинейных формул по определению коэффициента теплопроводности снега в зависимости от плотности. В частности, оценка ошибок, которые возникают при линеаризации известных формул.

Метод

Для достижения цели построим и исследуем на максимум целевую функцию абсолютной ошибки линеаризации усеченного полинома, которым аппроксимируется зависимость коэффициента теплопроводности снега от плотности. Целевая функция абсолютной ошибки линеаризации « f » будет иметь вид

$$\lambda_n = c\rho^n; \dots \lambda_l = a + b\rho; \dots f = \lambda_n - \lambda_l = (c\rho^n) - (a + b\rho) \dots (1)$$

Здесь, a, b, c – коэффициенты, имеющие соответствующую размерность; ρ – плотность снега, кг/м^3 ; λ_n и λ_l – коэффициенты теплопроводности снега, вычисленные по нелинейной и линейной зависимости от плотности, соответственно, Вт/мК .

Для исследования этой функции на максимум необходимо приравнять ее первую производную нулю.

$$\frac{df}{d\rho} = [nc\rho^{n-1}] - b = 0 \dots\dots\dots$$

Откуда найдем выражение для определения плотности снега, соответствующей максимальной ошибке от замены исходной функциональной зависимости линейной

$$\tilde{\rho} = \sqrt[n-1]{(b/cn)} \dots\dots\dots (2)$$

Коэффициент «с» является известной величиной, определенной авторами формул теоретически или в результате обработки данных экспериментальных исследований. Например, для формулы Абельса он равен 2,85^[17]; для формулы Кондратьевой-3,56^[11]; Для формулы Брэхта - 2,05^[18]. Для определения коэффициентов «а» и «b» составим следующую систему двух уравнений

$$c\rho_a^n = a + b\rho_a \text{ и } c\rho_b^n = a + b\rho_b, \dots\dots\dots (3)$$

откуда легко находятся искомые коэффициенты:

$$a = c\rho_a^n - b\rho_a; \quad b = c(\rho_b^n - \rho_a^n)/(\rho_b - \rho_a) \dots\dots\dots (4)$$

Используя второе уравнение в (4) из выражения (2) найдем

$$\tilde{\rho} = \left(\frac{F(\rho)}{n}\right)^{\frac{1}{n-1}}, \quad F(\rho) = (\rho_b^n - \rho_a^n)/(\rho_b - \rho_a) \dots\dots\dots (5)$$

Отсюда легко найти точки максимальной ошибки линеаризации в зависимости от вида функциональной зависимости коэффициента теплопроводности снега от его плотности. Для квадратичной зависимости имеем (n = 2):

$$F(\rho) = (\rho_b^2 - \rho_a^2)/(\rho_b - \rho_a) = (\rho_b + \rho_a); \quad \tilde{\rho} = (\rho_b + \rho_a)/2 \dots\dots\dots (6)$$

Данное выражение показывает, что максимальное значение расхождения результатов по линейной и нелинейной зависимости находится в середине интервала линеаризации.

Для кубической зависимости имеем (n = 3):

$$F(\rho) = (\rho_b^3 - \rho_a^3)/(\rho_b - \rho_a) = (\rho_b^2 + \rho_a^2 + \rho_b\rho_a); \quad \tilde{\rho} = \sqrt{(\rho_b^2 + \rho_a^2 + \rho_b\rho_a)/3} \dots\dots\dots (7)$$

Из формулы (7) следует, что положение точки максимальной невязки двух функций (линейной и нелинейной) зависит от показателя степени. Если рассматривать линеаризацию на начальном участке ($\rho_a = 0$), то формула (5) упростится и будет более наглядной для анализа. Что, кстати, не окажет влияния на получаемые выводы и проводимый анализ, так как всегда начало координат может быть сдвинуто введением новой переменной. Формула (5) преобразуется к виду

$$F(\rho) = \rho_b^{n-1}; \quad \tilde{\rho} = (\rho_b)/n^{\frac{1}{n-1}} \dots\dots\dots (8)$$

Результаты и обсуждение. Выражение (8) позволяет легко найти зависимость между точкой максимальной невязки функций (линейной и нелинейной) и показателем степени полинома:

$$n = 2 \sim \tilde{\rho} = \rho_b/2; \dots\dots\dots n = 3 \sim \tilde{\rho} = \rho_b/\sqrt{3}; \dots\dots\dots n = 4 \sim \tilde{\rho} = \rho_b/\sqrt[4]{4}.$$

Полученные соотношения ясно показывают, что максимальная ошибка при линеаризации зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега при увеличении степени полинома приближается к правой границе интервала линеаризации. Для наглядности анализа и объективности выводов по полученным формулам были проведены многовариантные расчеты, результаты которых представлены на рис. 1-3. На рисунке 1 приведен график положения точки максимальной ошибки расчетов при линеаризации в зависимости от показателя степени полинома аппроксимирующей функции

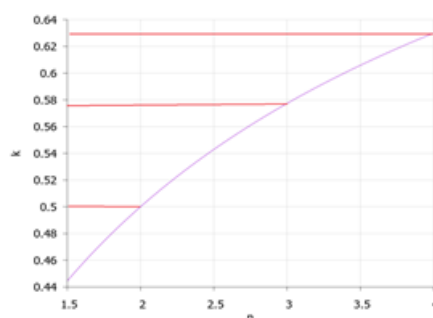


Рис. 1. Изменение параметра «к» в зависимости от показателя степени «n» линеаризуемой функции

В данном случае, для наглядности введен новый параметр, который равен $k = (\tilde{\rho}/\rho_b)$. Как видно из рисунка с ростом показателя степени линеаризуемой степенной функции точка максимальной ошибки смещается в сторону правой границы. Причем, при увеличении показателя степени «темп» приближения уменьшается. Так, с увеличением показателя степени с 2 до 3 коэффициент к изменяется в 1,16 раза, а с 3 до 4 в 1,09 раза. При показателе степени меньше двух, точка максимальной ошибки смещается в сторону левой (нижней) границы интервала линеаризации. Для квадратичной зависимости (наиболее часто встречающаяся при установлении функциональной связи между теплопроводностью и плотностью снега) точка максимальной ошибки находится в середине интервала линеаризации. На рис. 2 приведены графики результатов расчета коэффициента теплопроводности по линейной и нелинейной (формула Абельса) расчетным формулам и функции «f», которая характеризует зависимость ошибки от интервала усреднения и аргумента функции (плотности снега)

А) В)

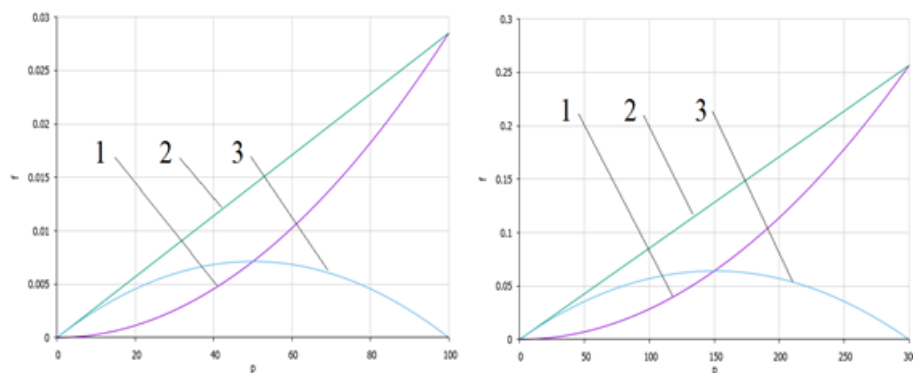


Рис. 2. Изменение функций теплопроводности снега от плотности при линеаризации формулы Абельса: интервал линеаризации А) 0-100 кг/м³; В) 0-300 кг/м³;

1 - формула Абельса; 2 - линейная функция; 3 - абсолютная ошибка линеаризации «f»

Из графиков следует важный вывод, что при линеаризации квадратичной зависимости точка, соответствующая максимальной ошибке линеаризации находится в середине участка линеаризации, а значение максимальной ошибки равно значению первичной функции в этой точке. Фактически это означает, что относительная ошибка линеаризации в точке максимума всегда равна 100%.

На рис. 3 приведен обобщающий 3-D график функции «f» характеризующий изменение абсолютной ошибки линеаризации в зависимости от длины интервала и изменения аргумента (плотности снега) внутри. Для изменения показателя аргумента внутри интервала введен параметр «m», который изменяется в пределах $0 \leq m \leq 1$ и численно равен отношению $m = \rho/\rho_B$.

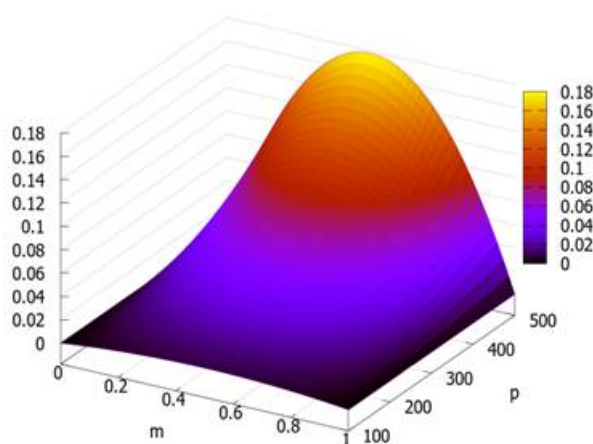


Рис. 3. Абсолютная ошибка в определении коэффициента теплопроводности снега при линеаризации формулы Абельса на разных участках интервала изменения плотности в пределах верхней границы отрезка линеаризации

График построен для квадратичной формулы Абельса^[17]. Выбор формулы продиктован её известностью и широким применением мировым научным сообществом уже более века. Все другие подобные формулы отличаются только величиной коэффициента «С», который изменяется от 2,05 (формула Брэхта) до 3,56 (формула Кондратьевой). Интересно отметить, что Г.Абельс вывел (на основе натурных исследований) и опубликовал свою формулу в 1893 г. А, в 2023 г. сотрудники МГТУ им. Н.Э.Баумана^[26] на основании комплексных лабораторных исследований пришли к выводу, что, полученная ими зависимость коэффициента теплопроводности от плотности снега практически идентична формуле Абельса в диапазоне изменения плотности снега ≤ 350 кг/м³. Этот факт, также послужил основанием для использования нами формулы Абельса в качестве примеров количественных расчетов при линеаризации функции коэффициента теплопроводности от плотности снега.

Заключение

Выполнен краткий анализ основных функциональных зависимостей для теоретического определения коэффициента теплопроводности от плотности снега. Наиболее известными являются линейные и квадратичные зависимости. Проведен анализ возможности линеаризации нелинейных зависимостей, описываемых усеченными полиномами различной степени. Получена в обобщенной форме целевая функция абсолютной ошибки линеаризации, исследование которой на максимум позволило сделать несколько важных выводов. В частности, установлено, что при линеаризации квадратичной зависимости

(формулы Абельса, Кондратьевой, Брэхта, Штурма и др.) максимальная абсолютная ошибка находится в середине интервала усреднения. При этом значение её равно значению исходной функции в этой точке. С увеличением показателя степени максимальная ошибка смещается к верхней границе участка линеаризации, и изменяется, например для кубического полинома (формула Ван Дуссена) до значения, равного 0,58 величены диапазона линеаризации. А, для полинома четвертой степени (формула Янсона) до 0,63 величены диапазона. При снижении показателя степени $< 2,0$ (формула Йена, Швандера), наоборот, максимальная ошибка линеаризации смещается от середины интервала к нижней границе. Статья имеет как научное значение, так и методическое значение и будет полезна для студентов и аспирантов, обучающихся по различным специальностям направления «Науки о Земле». Дальнейшие исследования в данной области целесообразно направить на получение универсальной формулы определения теплофизических характеристик всех видов снега (от нового до фирна), в широком диапазоне изменения плотности. Такая формула необходима для исследования формирования свойств снежного покрова при искусственном уплотнении (снежной мелиорации) и обоснования новых способов и средств управления состоянием снежного покрова. В частности, при борьбе с термоэрозией почв в криолитозоне и строительстве автозимников.

Библиография

1. Рихтер Г.Д. Роль снежного покрова в физико-географическом процессе. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. 171 с.
2. Park H., Fedorov A.N., Zheleznyak M.N., Konstantinov P.N., Walsh J.E. Effect of snow cover on pan-Arctic permafrost thermal regimes // *Climate Dynamics*. 2015. Vol. 44. P. 2873-2895. doi: 10.1007/s00382-014-2356-5.
3. Fedorov A.N., Novopriyehzhaya V.A., Fedorov N.A., Konstantinov P.Y., Samsonova V.V. Retrospective Analysis of Permafrost Landscape Evolution in Yakutia during the Holocene Warm Intervals // *Land*. 2020. Vol. 9. P. 463. doi:10.3390/land9110463.
4. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 346 с.
5. Шульгин А.М. Снежная мелиорация и климат почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 70 с.
6. Шульгин А.М. Снежный покров и его использование в сельском хозяйстве. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 84 с.
7. Кручинин И.Н. Формирование снежного наката с заданными свойствами на лесовозных автомобильных дорогах // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2012. № 1 (325). С. 38-41.
8. Аникин А.А., Барахтанов Л.В., Донато И.О. Физико-механические свойства снега как полотна пути для движения машин // *Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана: Электронный журнал*. 2010. № 10. С. 1-8.
9. Морозов В.С. Расчёт однослойных зимних автомобильных дорог на прочность // *Инновационная наука*. 2015. № 11-2. С. 84-88.
10. Fierz C., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Green E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground (IHP-VII Technical Documents in Hydrology № 83; IACS Contribution № 1). Paris: UNESCO-IHP, 2009. 80 p.
11. Yen Y.-C. Review of the thermal properties of snow, ice and sea ice. Tech. Rep. No. 81-10. Hanover, NH: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1981.
12. Calonne N., Flin F., Morin S., Lesaffre B., du Roscoat S.R., Geindreau C. Numerical and experimental investigations of the effective thermal conductivity of snow // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38. L23501. doi:10.1029/2011GL049234.
13. Fukusako S. Thermophysical properties of ice, snow, and sea ice // *International Journal*

- of Thermophysics. 1990. Vol. 11. No. 2. P. 353-372. doi:10.1007/bf01133567.
14. Кириллин А.Р., Железняк М.Н., Жирков А.Ф., Мисайлов И.Е., Верхотуров А.Г., Сивцев М.А. Особенности снегонакопления и параметры снежного покрова на Эльконском горном массиве // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26. № 7. С. 62-76. doi:10.21209/2227-9245-2020-26-7-62-76.
 15. Осокин Н.И., Сосновский А.В. Экспериментальные исследования коэффициента эффективной теплопроводности снежного покрова на Западном Шпицбергене // Лед и снег. 2014. Т. 54. № 3. С. 50-58.
 16. Осокин Н.И., Сосновский А.В. Пространственная и временная изменчивость толщины и плотности снежного покрова на территории России // Лёд и снег. 2014. № 4 (54). С. 72-80. doi:10.15356/2076-6734-2014-4-72-80.
 17. Abels G. Daily variation of temperature in snow and the relation between the thermal conductivity of snow and its density // Meteorol. Vestnik. 1893. Vol. 3.
 18. Calonne N., Milliancourt L., Burr A., Philip A., Martin C.L., Flin F., Geindreau C. Thermal conductivity of snow, firn, and porous ice from 3-D image-based computations // Geophysical Research Letters. 2019. Vol. 46. P. 13,079-13,089. doi:10.1029/2019GL085228.
 19. Поздняков С.П., Гриневский С.О., Дедюлина Е.А., Кореко Е.С. Чувствительность результатов моделирования сезонного промерзания к выбору параметризации теплопроводности снежного покрова // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 1. С. 67-80. doi:10.15356/2076-6734-2019-1-67-80.
 20. Sturm M., Holmgren J., König M., Morris K. The thermal conductivity of seasonal snow // Journal of Glaciology. 1997. Vol. 43. No. 143. P. 26-41.
 21. Sulakvelidze G.K. Thermo-conductivity equation for vapor diffusivity of naturally compacted snow // Bulletin of the Academy of Sciences USSR, Geophysical Series. 1959. P. 186-188.
 22. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: "Гео", 2008. 229 с.
 23. Галкин А.Ф., Плотников Н.А. Расчет коэффициента теплопроводности снежного покрова // Арктика и Антарктика. 2023. № 3. С. 16-23. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.3.43733 EDN: VMDOVA URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=43733
 24. Yen Y.-C. Effective thermal conductivity and water vapor diffusivity of naturally compacted snow // Journal of Geophysical Research. 1965. Vol. 70. P. 1821-1825.
 25. Чернов Р.А. Экспериментальное определение теплопроводности глубинной изморози // Лёд и снег. 2013. № 3 (123). С. 71-77.
 26. Борисов В.А., Акинин Д.В., Гасилина М.А., Романова А.Р. Теплопроводность снежного покрова и физические процессы, происходящие в нём под влиянием температурного градиента // Resources and Technology. 2023. Т. 20. № 4. С. 45-73. doi:10.15393/j2.art.2023.7243.
 27. Веркин Б.И., Янсон И.К., Суходуб Л.Ф., Теплицкий А.Б. Взаимодействия биомолекул: новые экспериментальные подходы и методы. Киев: Наукова Думка, 1985. 163 с.

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Предметом изучения является изучение ошибки линеаризации зависимости коэффициента теплопроводности снега от плотности.

Тема исследований достаточно актуальна, поскольку снежный покров играет важную роль в формировании климата криолитозоны. Снежный покров имеет способность

существенно изменять свои свойства в зависимости от температурного режима и времени. Одним из главных параметров снега является его теплопроводность, которая, по мнению большинства исследователей, может быть определена, как функция плотности. Поэтому актуальным является изучение зависимости теплопроводности снега от его плотности, а также изучение ошибки линеаризации этой зависимости. Целью данной работы было сравнение расчетных линейных и нелинейных формул по определению коэффициента теплопроводности снега в зависимости от плотности. В частности, оценка ошибок, которые возникают при линеаризации известных формул.

Методология исследования основана на применении метода целевой функции абсолютной ошибки линеаризации усеченного полинома, которым аппроксимируется зависимость коэффициента теплопроводности снега от его плотности.

Научная новизна исследований в статье заключается в использовании оригинального метода целевой функции абсолютной ошибки линеаризации усеченного полинома которым аппроксимируется зависимость изучаемых показателей.

Стиль статьи – научный, с элементами доказательной математики. Авторами статьи представлен собственный расчетный материал по изучению ошибок линеаризации зависимости коэффициента теплопроводности снега от его плотности. Автором показано, что максимальная ошибка при линеаризации зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега при увеличении степени полинома приближается к правой границе интервала линеаризации. Из графического материала следует, что при линеаризации квадратичной зависимости точка, соответствующая максимальной ошибки линеаризации находится в середине участка линеаризации, а значение максимальной ошибки равно значению первичной функции в этой точке. Фактически это означает, что относительная ошибка линеаризации в точке максимума всегда равна 100%. В статье авторами даны все расчетные формулы, представлены графические доказательства полученных данных.

Структура статьи соответствует требованиям журнала «Арктика и Антарктика».

Однако, следует высказать пожелание по увеличению текстового объема статьи еще на 3-4 тыс. знаков, согласно требованиям журнала.

Библиография статьи включает в себя 27 литературных источника, в том числе 10 - на иностранном языке. Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на литературные источники.

Выводы в статье обоснованы и отражают результаты проведенных исследований. Автором установлено, что при линеаризации квадратичной зависимости (формулы Абельса, Кондратьевой, Брэхта, Штурма и др.) максимальная абсолютная ошибка находится в середине интервала усреднения. При этом значение её равно значению исходной функции в этой точке. С увеличением показателя степени максимальная ошибка смещается к верхней границе участка линеаризации, и изменяется, например для кубического полинома (формула Ван Дуссена) до значения, равного 0,58 величины диапазона линеаризации.

Статья имеет как научное значение, так и методическое значение и будет полезна для студентов и аспирантов, обучающихся по различным специальностям направления «Науки о Земле». Дальнейшие исследования в данной области целесообразно направить на получение универсальной формулы определения теплофизических характеристик всех видов снега.

Рецензируемая статья рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика». Существенных замечаний по статье не отмечено, по тексту имеются незначительные ошибки и пропущенные буквы в словах, которые необходимо исправить.

Англоязычные метаданные

Long-term creep of frozen soils in multi-year tests

Tao Dachzhi

Postgraduate student; Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University

119234, Russia, Moscow, Ramenki district, ter. Leninskie Gory, 1

✉ taoolga@yeah.net

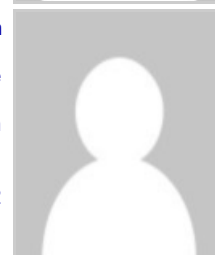
**Alekseev Andrei Grigor'evich**

Doctor of Technical Science

Head of the Center for Geocryological and Geotechnical Research of the N.M. Gersevanov National Research Institute of Natural Sciences

109428, Russia, Moscow, Ryazan district, 2nd Institutskaya str., 6, building 12

✉ adr-alekseev@yandex.ru

**Brushkov Anatolii Viktorovich**

Doctor of Geology and Mineralogy

Head of the Department of Geocryology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University

119234, Russia, Moscow, Ramenki district, ter. Leninskie Gory, 1

✉ geocryology@mail.ru



Abstract. This study focuses on the long-term creep behavior of frozen saline soils (sand, silty, loam) under constant temperature and mechanical loading conditions. The frozen soil samples were collected in situ from modern marine and alluvial Quaternary deposits on the Yamal Peninsula. Special attention is given to the temporal deformation dynamics under uniaxial compression. The research aims to identify patterns in deformation rate changes, analyze both primary (transient) and secondary (steady-state) creep stages, and compare experimental results with theoretical models of aging, hardening, and flow behavior. Experiments were conducted during 9 years in the underground laboratory of the Amderma Permafrost Station at a depth of 14 meters, which enabled investigation into the long-term mechanical behavior of frozen soils. The findings are of significant importance for predicting the stability of building foundations in permafrost regions and for preventing structural failures. The research method involved prolonged laboratory testing of frozen soil specimens using uniaxial compression under constant temperature and stress conditions. The scientific novelty of this study lies in the unprecedented duration of the experiments (to 9 years), which far exceeds the time frames of most previously conducted creep tests. In most existing studies, the maximum duration of creep testing for frozen soils in various conditions did not exceed several months. For the first time over such an extended time span, it has been shown that sands and silty exhibit a transition from unstable to stable deformation stages, whereas loams demonstrate nonlinear behavior, presumably due to crack formation and internal structural changes. The application of mathematical modeling enabled refinement of deformation prediction parameters, which is of practical significance for engineering calculations. The obtained results enhance the reliability of foundation stability assessments and provide a scientific basis for the design of buildings and infrastructure in permafrost regions.

Keywords: structure, admerminskaya underground laboratory, engineering geocryology, permafrost, deformation, long-term testing, theory, uniaxial compression, creep of frozen soils, damped creep

References (transliterated)

1. Brushkov A.V., Alekseev A.G., Badina S.V. i dr. Opyt ekspluatatsii sooruzhenii i neobkhodimost' upravleniya teplovym rezhimom gruntov v kriolitozone // Zapiski Gornogo instituta. 2023. T. 263. S. 742-756.
2. Li, X., Cheng, G.D. A GIS-aided response model of high altitude permafrost to global change // Science in China (Series D). 1999. № 42(1). S. 72-79.
3. Yu, F., Qi, J.L., Yao, X.L., Liu, Y.Z. In-situ monitoring of settlement at different layers under embankments in permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau // Engineering Geology. 2013. № 160. S. 44-53.
4. Qi, J., Wen, Z., Zhang, J. Settlement of embankments in permafrost regions in the Qinghai-Tibetan plateau // Norwegian Journal of Geography. 2007. № 61(2). S. 49-55.
5. Ma, W., Qi, J.L., Wu, Q.B. Analysis of the deformation of embankments on the Qinghai-Tibet railway // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2008. № 134(11). S. 1645-1654.
6. Bronfenbrener, L., Bronfenbrener, R. Creep characteristics of frozen soils under conditions of small strains // Cold Regions Science and Technology. 2012. № 79. S. 84-91.
7. Bray, M.T. The influence of cryostructure on the creep behavior of ice-rich permafrost // Cold Regions Science and Technology. 2012. № 79-80. S. 43-52.
8. Brushkov A.V. Zasolennye merzlye porody Arkticheskogo poberezh'ya, ikh proiskhozhdenie i svoistva. M.: Izd-vo MGU, 1998. 330 s.
9. Zhou, X., Guo, L., Li, Z. Multiaxial creep of frozen loess // Mechanics of Materials. 2016. № 95. S. 172-191.
10. Song, Y., Zhang, Y., Li, C. Creep characteristics and constitutive model for frozen mixed soils // Journal of Mountain Science. 2021. № 18(7). S. 1966-1976.
11. Tsytoich N.A. Mekhanika merzlykh gruntov. Moskva: Izd-vo MGU, 1973.
12. Vyalov S.S. Reologiya merzlykh gruntov // Pod redaktsiei V.N. Razbegin. Moskva: Stroiizdat, 2000.
13. Roman L.T., Brushkov A.V., Magomedgadzhieva A.M. Otsenka dostovernosti opredeleniya dlitel'noi deformatsii merzlykh zasolennykh gruntov // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 1996. № 2. S. 20-24.
14. Brushkov A.V., Aksenov V.I. Opredelenie kharakteristik polzuchesti zasolennykh merzlykh gruntov iz opytov na odnoosnoe szhatie // Zasolennye merzlye grunty kak osnovaniya sooruzhenii: Sb. nach. tr. M.: "Nauka", 1999. S. 83-90.
15. Zhang, H., Zhang, J., Zhang, Z., Chen, J., and You, Y. A consolidation model for estimating the settlement of warm permafrost // Computers and Geotechnics. 2016. № 76. S. 43-50.
16. Liingaard, M., Augustesen, A.H., Lade, P.V. Characterization of models for time-dependent behavior of soils // International Journal of Geomechanics. 2004. № 4(3). S. 157-177.
17. Chen, J., Yang, X., Li, D. A long-term strength criterion for frozen clay under complex stress states // Cold Regions Science and Technology. 2020. № 176. S. 103089.
18. Hyndman, R.J., Koehler, A.B. Another look at measures of forecast accuracy //

- International Journal of Forecasting. 2006. № 22(4). S. 679-688.
19. Roman L.T. Mekhanika merzlykh gruntov. M.: MAIK "Nauka"/Interperiodika, 2002. 426 S.
20. Roman L.T., Kotov P.I. Opredelenie vyazkosti merzlykh gruntov sharikovym shtampom // Kriosfera Zemli. 2013. T. 17, № 4. S. 30-35.
21. Benedict, J.B. Frost creep and gelifluction features: A review // Quaternary Research. 1976. № 6. S. 55-76.

Assessment of air quality in the area of the future ecotechnopark "Vostok" (Usolye-Sibirskoye, Irkutsk region) based on snow geochemical survey data.

Kachor Olga Leonidovna

Doctor of Technical Science

Head of the Department of Geoecology, Siberian School of Geosciences; Irkutsk National Research Technical University

3 Akademika Kurchatov str., Irkutsk, 664074

✉ olgakachor@geo.istu.edu



Parshin Alexander Vadimovich

PhD in Geology and Mineralogy

Director; Institute of Siberian School of Geosciences; Irkutsk National Research Technical University
Senior Researcher; Institute of Geochemistry SB RAS

3 Akademika Kurchatov str., Irkutsk, Sverdlovsk region, 664074, Russia

✉ sarhin@geo.istu.edu



Trusova Valentina Valer'evna

PhD in Technical Science

Senior Researcher; Siberian School of Geosciences; Irkutsk National Research Technical University
Senior Researcher; Institute of Geochemistry SB RAS

3 Akademika Kurchatov str., Irkutsk, 664074

✉ wtrusova@geo.istu.edu



Kurina Anastasiya Vladimirovna

Research Engineer; Siberian School of Geosciences; Irkutsk National Research Technical University

3 Akademika Kurchatov str., Irkutsk, 664074

✉ kurinanaya@geo.istu.edu



Ikramov Ziyoviddin Lutfiddin ugli

Postgraduate student; Institute of Siberian School of Geosciences; Irkutsk National Research Technical University

3 Akademika Kurchatov str., Irkutsk, 664074

✉ ziyoviddin.ikramov1992@gmail.com



Abstract. The subject of the work is the development of a methodology for snow geochemical research for effective express assessment of air quality under technogenic influence from various industrial sources that shape complex environmental pollution, as well as the creation

of an informational and cartographic basis for further ecological monitoring of a significant area in the Baikal region. By examining a detailed assessment of atmospheric pollution in the area of the construction of the "Vostochniy" ecotechnopark, a comparative analysis of the informativeness of cartograms showing the distribution of pollutants in snow water and solid residue is conducted. The surveyed area contains various sources of technogenic impact, ranging from metallurgical enterprises to heat energy generation facilities; thus, this case excellently illustrates the advantages of the snow geochemical survey method as the most representative way to assess atmospheric pollution in the tasks of ecological monitoring in "winter" regions, mitigating ecological risks from new mining projects in the northern part of Eurasia, and controlling industrial activities in cities with a persistent snow cover. Optimizing this type of geoecological research is a highly relevant task. Seasonal snow samples were collected, and the snow water was melted and filtered to separate soluble and insoluble forms of pollutants. A chemical analysis of the snow water and solid residue was performed. Element associations corresponding to various sources of impacts were determined. Cartographic materials characterizing the distribution of pollutants across the area were presented. The research allows for a clear comparison of results obtained using the traditional, yet costly, methodology for analyzing snow water through precision chemical-analytical methods such as ICP-AES/MS, and through an express and inexpensive methodology for analyzing solid residue using non-destructive analysis (XRF). It was shown that the latter method is also quite informative, allowing for a detailed characterization of the geoecological situation over a significant area with minimal costs, identifying and mapping zones with abnormally technogenic conditions in the atmosphere. As a result, the most detailed spatial characterization of air pollution in the area of Usolye-Sibirskoye is provided, which is a constant focus of attention from state ecological control authorities as a rehabilitated site of accumulated environmental damage and simultaneously a promising production site. The described methodological approaches are applicable to a wide range of geoecological situations in regions with prolonged winters.

Keywords: Usolye-Sibirskoye, mercury, assessment of background conditions, snow cover, heavy metals, environmental monitoring, snow geochemical survey, air pollution, air quality, accumulated harm objects

References (transliterated)

1. Solov'yanov A. A. Proshlyi (nakoplenyi) ekologicheskii ushcherb: problemy i resheniya. O rtutnom zagryaznenii v Zapadnoi Sibiri // *Ekologicheskii vestnik Rossii*. – 2016. – № 4. – S. 22-30. – EDN VUSW XF.
2. Koval', P. V. I dr. Antropogennaya komponenta i balans rtuti v ekosisteme Bratskogo vodokhranilishcha / P. V. Koval', G. V. Kalmychikov, S. M. Lavrov [i dr.] // *Doklady Akademii nauk*. – 2003. – T. 388, № 2. – S. 225-227. – EDN OPTLRX.
3. Pastukhov M. V., Poletaeva V. I., Butakov E. V. Raspredelenie rtuti v shlamonakopitele "USOL"EKHIMPROM i ego vliyanie na okruzhayushchuyu sredu // *Geograficheskie osnovy i ekologicheskie printsipy regional'noi politiki prirodoopol'zovaniya: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Irkutsk, 23-27 sentyabrya 2019 g.* – Irkutsk: Institut geografii im. V. B. Sochavy SO RAN, 2019. – S. 553-556. – EDN MWSZPK.
4. Alieva, V. I. Gidrokhimicheskaya kharakteristika reki Angary v raione vliyaniya Usol'skogo promyshlennogo uzla / V. I. Alieva, M. V. Pastukhov // *Geografiya i prirodnye resursy*. – 2012. – № 1. – S. 68-73. – EDN PXJFVV.
5. Poletaeva V. I., Pastukhov M. V., Tirsikh E. N. Dynamics of trace element composition

- of Bratsk Reservoir water in different periods of anthropogenic impact (Baikal Region, Russia) // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. – 2021. – Vol. 80, no. 3. – P. 531-545. DOI: 10.1007/s00244-021-00819-1 EDN: AHFFWA.
6. Osobennosti tekhnogennogo zagryazneniya i formy perenosa rtuti v Bratskom vodokhranilishche / V. I. Alieva, E. V. Butakov, M. V. Pastukhov, L. D. Andrulaitis // Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya. – 2011. – № 5. – S. 431-438. – EDN ODXIAL.
 7. Poletaeva, V. I. Vliyanie stochnykh vod Usol'skoi promzony na gidrokhimicheskii sostav r. Angara / V. I. Poletaeva, M. V. Pastukhov // Ekologo-geograficheskie problemy regionov Rossii: materialy VII vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 105-letiyu so dnya rozhdeniya issledovatelya Samarskoi Luki, k.g.n. G.V. Obedientovoi, Samara, 15 yanvarya 2016 goda / otv. red. I.V. Kazantsev. – Samara: Povolzhskaya gosudarstvennaya sotsial'no-gumanitarnaya akademiya, 2016. – S. 74-77. – EDN VLOBNT.
 8. Poletaeva, V. I. Osobennosti povedeniya tekhnogennykh elementov v ekosisteme Bratskogo vodokhranilishcha / V. I. Poletaeva, M. V. Pastukhov // Sovremennye problemy regional'nogo razvitiya: Tezisy VI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Birobidzhan, 04-06 oktyabrya 2016 goda / Pod redaktsiei E. Ya. Frismana. – Birobidzhan: Institut kompleksnogo analiza regional'nykh problem Dal'nevostochnogo otdeleniya RAN, 2016. – S. 153-156. – EDN XRTDMZ.
 9. Pastukhov, M. V. Akkumulyatsiya tekhnogennoi rtuti v donnykh otlozheniyakh sedimentatsionnogo bar'era Bratskogo vodokhranilishcha / M. V. Pastukhov, V. I. Poletaeva // Rtut' i drugie tyazhelye metally v ekosistemakh. Sovremennye metody issledovaniya sodержaniya tyazhelykh metallov v okruzhayushchei srede: Tezisy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii i shkoly-seminara dlya molodykh uchenykh, aspirantov i studentov, Cherepovets, 14-16 maya 2018 goda / Otv. red. E. S. Ivanova. – Cherepovets: Cherepovetskii gosudarstvennyi universitet, 2018. – S. 49-50. – EDN XRFOTJ.
 10. Kholodova M. S., Poletaeva V. I., Pastukhov M. V. Features of the microelement composition of the liquid phase in snow cover from the towns of Usolye-Sibirskoe and Svirk // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 381. – P. 012041. – DOI: 10.1088/1755-1315/381/1/012041.
 11. Tsvetkova, E. A. Dynamics of mercury concentrations in wastewater from the Usolye-Sibirskoye industrial zone in periods with different technogenic loads / E. A. Tsvetkova, V. I. Poletaeva, M. V. Pastukhov // Limnology and Freshwater Biology. – 2022. – No. 3. – P. 1346-1348. – DOI 10.31951/2658-3518-2022-A-3-1346. – EDN IWNVST.
 12. Pastukhov, M. V. Khimicheskii sostav planktona kak pokazatel' zagryazneniya Bratskogo vodokhranilishcha / M. V. Pastukhov, V. I. Poletaeva // Sovremennye napravleniya razvitiya geokhimii: materialy Vserossiiskoi konferentsii (s uchastiem zarubezhnykh uchenykh), posvyashchennoi 65-letiyu Instituta geokhimii im. A. P. Vinogradova i 105-letiyu so dnya rozhdeniya akademika L. V. Tausona, Irkutsk, 21-25 noyabrya 2022 goda. – Irkutsk: Institut geografii im. V. B. Sochavy Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk, 2022. – S. 80-84. – EDN PXSOL.
 13. Mineral'no-veshchestvennyi sostav tverdogo osadka snegovogo pokrova v razlichnykh funktsional'nykh zonakh G. Usol'e-Sibirskoe / M. S. Kholodova, M. V. Pastukhov, V. A. Bychinskii [i dr.] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2022. – T. 333, № 9. – S. 219-230. – DOI 10.18799/24131830/2022/9/3687. – EDN IXLWDW.
 14. Osobennosti mikroelementnogo sostava snegovogo pokrova G. Usol'e-Sibirskoe / M. S.

- Kholodova, S. N. Prosekin, E. N. Tirsikh, P. G. Dolgikh // Geomorfologiya i fizicheskaya geografiya Sibiri v XXI veke: Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya zaslužennogo rabotnika vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii, pochetnogo chlena Russkogo geograficheskogo obshchestva, professora, doktora geograficheskikh nauk Zemtsova Alekseya Anisimovicha, Tomsk, 18-19 fevralya 2020 goda. – Tomsk: Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii gosudarstvennyi universitet, 2020. – S. 150-153. – EDN TYQZFN.
15. Savchenkov, K. S. Soderzhanie rtuti v pochvakh Usol'skoi promyshlennoi zony i privileyushchei k nei territorii / K. S. Savchenkov, M. V. Pastukhov // Problemy transformatsii estestvennykh landshaftov v rezul'tate antropogennoi deyatel'nosti i puti ikh resheniya: Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchnoi ekologicheskoi konferentsii, posvyashchennoi Godu nauki i tekhnologii, Krasnodar, 29-31 marta 2021 goda. – Krasnodar: Kubanskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet imeni I. T. Trubilina, 2021. – S. 425-428. – EDN EMOSEM.
 16. Gordeeva, O. Mercury bioaccumulation by higher plants and mushrooms around chlor-alkali and metallurgical industries in the Baikal region, Southern Siberia, Russia / O. Gordeeva, G. Belogolova, M. Pastukhov // Chemistry and Ecology. – 2021. – Vol. 37, No. 8. – P. 729-745. – DOI 10.1080/02757540.2021.1972983. – EDN NYMUEP.
 17. Azovskii, M. G. Uroven' nakopleniya rtuti v vodnykh rasteniyakh kak pokazatel' zagryazneniya vodoemov / M. G. Azovskii, M. V. Pastukhov, V. I. Grebenshchikova // Voda: khimiya i ekologiya. – 2010. – № 8(26). – S. 20-24. – EDN MUQHVD.
 18. Pastukhov, M. V. Biogeokhimicheskie osobennosti nakopleniya rtuti planktonom Bratskogo vodokhranilishcha (Pribaikal'e) / M. V. Pastukhov, V. I. Grebenshchikova, N. G. Sheveleva // Problemy regional'noi ekologii. – 2009. – № 1. – S. 42-47. – EDN KARXFT.
 19. Bioakkumulyatsiya rtuti v pishchevykh tsepyakh okunya Irkutskogo i Bratskogo vodokhranilishch / M. V. Pastukhov, V. I. Grebenshchikova, O. S. Ryazantseva, V. I. Alieva // Sovremennye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov: trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Perm', 26-28 maya 2009 g. V 2 t. T. 2. – Perm': Perm. gos. nats. issled. un-t, 2009. – S. 335-340. – EDN HRQLDT.
 20. Gigienicheskaya otsenka soderzhaniya rtuti v atmosfernom vozdukh na territorii promyshlennoi ploshchadki goroda Usol'e-Sibirskoe / T. I. Kucherskaya, L. A. Alikbaeva, M. Yu. Kombarova [i dr.] // Aktual'nye voprosy gigieny: sb. nauch. tr. IX Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, Sankt-Peterburg, 17 fevr. 2024 g. – SPb.: Sev.-Zap. gos. med. un-t im. I. I. Mechnikova, 2024. – S. 133-137. – EDN GVHKBL.
 21. Kucherskaya, T. I. Gigienicheskaya otsenka zagryazneniya pochv rtut'yu na territorii promyshlennoi ploshchadki g. Usol'e-Sibirskoe / T. I. Kucherskaya, L. A. Alikbaeva, M. Yu. Kombarova // Profilakticheskaya meditsina – 2022: sb. nauch. tr. Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, Sankt-Peterburg, 30 noyab. – 01 dek. 2022 g. / pod red. A. V. Mel'tsera, I. Sh. Yakubovoi. – SPb.: Sev.-Zap. gos. med. un-t im. I. I. Mechnikova, 2022. – S. 153-156. – EDN DRBCIQ.
 22. Alykova, O. I. Nakoplenyi ekologicheskii vred: problemy i posledstviya. Soobshchenie 2. Analiz situatsii / O. I. Alykova, L. Yu. Chuikova, Yu. S. Chuikov // Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya. – 2021. – № 2(62). – S. 114-137. – DOI 10.36698/2304-5957-2021-2-114-137. – EDN FMUSDM.
 23. Petrova, A. S. Realizatsiya ekologicheskikh proektov Goskorporatsiei "Rosatom" / A. S. Petrova // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. – 2023. – № 4. – S. 28-34. – DOI 10.25750/1995-4301-2023-4-028-034. – EDN LQZLNV.

24. Glava "Rosatoma" Aleksei Likhachev i zampredpravitel'stva RF Dmitrii Patrushev posetili promploshchadku "Usol'ekhimproma" [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://atommedia.online/2024/10/01/glava-rosatoma-aleksej-lihachev-i-za/> (data obrashcheniya: ukazhi sam pri neobkhodimosti).
25. Tsvetkova, E. A. Gidrokhimicheskaya kharakteristika r. Angara v usloviyakh vozdеistviya promyshlennoi zony (g. Usol'e-Sibirskoe) / E. A. Tsvetkova, V. I. Poletaeva // Geologiya na okraine kontinenta: mater. II molodezh. nauch. konf.-shkoly DVGI DVO RAN, Vladivostok, 12-16 sent. 2022 g. – Vladivostok: Dal'nevost. feder. un-t, 2022. – S. 218-221. – EDN VCXHNQ.
26. Tsvetkova, E. A. Kharakteristika stochnykh vod promyshlennoi zony g. Usol'ya-Sibirskogo i ikh vliyanie na gidrokhimicheskii sostav r. Angary v periody s raznoi tekhnogennoi nagruzkoi / E. A. Tsvetkova, V. I. Poletaeva, M. V. Pastukhov // Izv. Tomskogo politekhn. un-ta. Inzhiniring georesursov. – 2024. – T. 335, № 5. – S. 39-58. – DOI 10.18799/24131830/2024/5/4314. – EDN FHXWIE.
27. Poletaeva, V. I. Tekhnogennoe vozdеistvie stochnykh vod na gidrokhimicheskii sostav r. Angary / V. I. Poletaeva, M. V. Pastukhov // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. – 2022. – № 3. – S. 90-95. – DOI 10.25750/1995-4301-2022-3-090-095. – EDN EBRLIR.
28. Tsvetkova, E. A. Otsenka vozdеistviya promyshlennykh stochnykh vod na kachestvo vod reki Angara v period snizheniya tekhnogennoi nagruзки / E. A. Tsvetkova, V. I. Poletaeva // Ekologiya rodnogo kraia: problemy i puti ikh resheniya: mater. XVII Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, Kirov, 26-27 apr. 2022 g. Kn. 1. – Kirov: Vyat. gos. un-t, 2022. – S. 253-258. – EDN MQUGAY.
29. Tsvetkova, E. A. Transformatsiya gidrokhimicheskogo sostava vod r. Angara v zone vozdеistviya tekhnogennykh istochnikov / E. A. Tsvetkova, V. I. Poletaeva, V. A. Bychinskii // Sovremennye napravleniya razvitiya geokhimii: mater. Vseros. konf. (s uchastiem zarubezh. uchenykh), posvyashch. 65-letiyu In-ta geokhimii im. A. P. Vinogradova i 105-letiyu akad. L. V. Tausona, Irkutsk, 21-25 noyab. 2022 g. – Irkutsk: In-t geografii im. V. B. Sochavy SO RAN, 2022. – S. 201-203. – EDN IHWDIJ.
30. Tsvetkova, E. A. Kontsentratsii mikroelementov v talykh vodakh promyshlennoi zony g. Usol'e-Sibirskoe / E. A. Tsvetkova // Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XXVII Mezhdunar. molodezh. nauch. simpoz. im. akad. M. A. Usova, posvyashch. 160-letiyu akad. V. A. Obrucheva i 140-letiyu akad. M. A. Usova, Tomsk, 03-07 apr. 2023 g. – Tomsk: Nats. issled. Tom. politekhn. un-t, 2023. – S. 264-266. – EDN QULSNO.
31. Tsvetkova, E. A. Osnovnoi ionnyi sostav talykh vod promyshlennoi zony g. Usol'e-Sibirskoe / E. A. Tsvetkova, V. I. Poletaeva, M. V. Pastukhov // Nauki o Zemle. Sovremennoe sostoyanie: materialy VI Vserossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi shkoly-konferentsii, p. Zhemchuzhnyi, Geologicheskii poligon "Shira", 30 iyulya – 5 avgusta 2023 g. – Novosibirsk: Novosibirskii natsional'nyi issledovatel'skii gosudarstvennyi universitet, 2023. – S. 169-171. – EDN DAMWAT.
32. Raputa, V. F. Analiz vynosov rtuti s promploshchadki "Usol'ekhimproma" / V. F. Raputa, R. A. Amikishieva, T. V. Yaroslavtseva // Interekspo Geo-Sibir'. – 2021. – T. 4, № 1. – S. 193-198. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-4-1-193-198. – EDN NJBBUG.
33. Kucherskaya, T. I. Otsenka soderzhaniya rtuti v pochve na territorii promyshlennoi ploshchadki g. Usol'e-Sibirskoe / T. I. Kucherskaya, M. Yu. Kombarova // Mediko-biologicheskie aspekty khimicheskoi bezopasnosti: sbornik nauchnykh trudov V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, Sankt-Peterburg, 27-29 sentyabrya 2023 g. – SPb.: NII gigieny, profpatologii i ekologii cheloveka FMBA, 2023. – S. 41-42. – EDN HNLEZW.

34. Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Irkutskoi oblasti v 2023 godu". – Irkutsk: ООО "Maksima", 2024. – 308 s.: il.
35. Ofitsial'nyi sait administratsii goroda Usolie-Sibirskoe. Perechen' predpriyatii, okazyvayushchikh NVOS na territorii goroda [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://usolie-sibirskoe.ru/ekologiya/monitoring-atmosfernogo-vozdukha-rospotrebnadzor> (data obrashcheniya: 10.04.2025).
36. O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2023 godu: proekt Gosudarstvennogo doklada. – M.: Minprirody Rossii; ООО "Intellectual'naya analitika"; FGBU "Direktsiya NTP"; Fond ekologicheskogo monitoringa i mezhdunarodnogo tekhnologicheskogo sotrudnichestva, 2024. – 707 s.
37. Federal'nyi tsentr khimii [Elektronnyi resurs]. – URL: <http://fcc.pi-school.ru/> (data obrashcheniya: 10.04.2025).
38. Ivanova, U. S. Printsipy priirashcheniya natsional'nogo blagosostoyaniya na primere razrabotki Federal'nogo tsentra khimii v g. Usolie-Sibirskoe / U. S. Ivanova, Yu. V. Zvorykina, M. V. Vasil'kova, A. V. Oleinik // Progressivnaya ekonomika. – 2024. – № 1. – S. 32-54. – DOI 10.54861/27131211_2024_1_32. – EDN ZWFRVQ.
39. Belozertseva, I. A. Zagryaznenie atmosfery i sodержanie ftora v snege na akvatorii oz. Baikal / I. A. Belozertseva, I. B. Vorob'eva, N. V. Vlasova [i dr.] // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2015. – № 2-2. – S. 735. – EDN UZJITD.
40. Nosova, O. V. Monitoring snezhnogo pokrova selitebnoi zony g. Noril'ska / O. V. Nosova, A. V. Kaverzin // Kul'tura. Nauka. Proizvodstvo. – 2019. – № 4. – S. 30-36. – EDN ZPFUYT.
41. Daunov, B. Ya. Monitoring zagryazneniya atmosfery i snezhnogo pokrova s tsel'yu predotvrashcheniya ChS tekhnogennogo kharaktera / B. Ya. Daunov // Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsii. – 2018. – T. 1. – S. 159-161. – EDN YXLNIL.
42. Mishchenko, O. A. Monitoring sostoyaniya snezhnogo pokrova na territorii Khabarovskogo kraya / O. A. Mishchenko, A. A. Shelganova // Otkhody i resursy. – 2022. – T. 9, № 3. – DOI 10.15862/11ECOR322. – EDN QUVJWR.
43. Asfandiyarova, L. R. Analiz sostoyaniya atmosfernogo vozdukha pri pomoshchi monitoringa snezhnogo i pochvennogo pokrova / L. R. Asfandiyarova, T. Z. Zabiroy, A. R. Baitimirov // Reshenie. – 2020. – T. 1. – S. 62-64. – EDN HSUPQW.
44. Novorotskaya, A. G. O rezul'tatakh khimicheskogo monitoringa snezhnogo pokrova Khabarovska / A. G. Novorotskaya // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. – 2018. – № 12-2. – S. 374-379. – EDN MLQEPB.
45. Afonina, T. E. Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova uglevodorodnymi soedineniyami / T. E. Afonina // Vestnik IrGSKhA. – 2023. – № 117. – S. 8-18. – DOI 10.51215/1999-3765-2023-117-8-18. – EDN QTVVEV.
46. Lomskov, M. A. Monitoring sodержaniya tyazhelykh metallov v snezhnom pokrove otdel'nykh uchastkov trekh parkovykh territorii Moskvy / M. A. Lomskov, A. M. Konovalov, K. I. Shurukht // Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki. – 2022. – № 3. – S. 27-29. – DOI 10.37882/2223-2966.2022.03.23. – EDN DJIKSU.
47. Gonchar, N. V. Snegovaya s'emka v predelakh mestorozhdenii mednykh rud v gornopromyshlennykh raionakh Urala / N. V. Gonchar, A. B. Makarov, O. M. Guman, I. A. Antonova // Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – T. 27, № 2. – S. 158-169. – DOI 10.21443/1560-9278-2024-27-2-158-169. – EDN KTHGKZ.
48. Ermolov, Yu. V. Vklad vybrosov metallurgii v pyleaerozol'noe zagryaznenie Noril'skogo

- promyshlennogo raiona po snegogeokhimicheskim dannym / Yu. V. Ermolov, I. D. Makhatkov, A. S. Cherevko // Optika atmosfery i oken. – 2023. – T. 36, № 2 (409). – S. 93-99. – DOI 10.15372/AOO20230203. – EDN MYUNFY.
49. Filimonova, L. M. Otsenka zagryazneniya atmosfery v raione alyuminievogo proizvodstva metodom geokhimicheskoi s'emki snezhnogo pokrova / L. M. Filimonova, A. V. Parshin, V. A. Bychinskii // Meteorologiya i gidrologiya. – 2015. – № 10. – S. 75-84. – EDN UYCNVJ.
50. Kuznetsova O. V., Kachor O. L., Matyukhin I. A., Ikramov Z. L., Parshin A. V. Ekspressnyi rentgeno fluorescentsentnyi analiz kak sovremennaya al'ternativa traditsionnym spektral'nym metodam pri reshenii zadach geokhimicheskikh poiskov. Nauki o Zemle i nedropol'zovanie. – 2023. – T. 46, № 4. – S. 390-401. – DOI 10.21285/2686-9993-2023-46-4-390-401. – EDN XMXIYB.
51. Kachor, O. L. O rezul'tatakh issledovaniy kachestva atmosfernogo vozdukh v mikroraione Irkutsk-2 i poselke Bokovo (yugo-zapadnoe Pribaikal'e) metodom snegogeokhimicheskoi s'emki / O. L. Kachor, A. V. Parshin, Z. L. Ikramov, V. V. Trusova, A. V. Kurina // Nauki o Zemle i nedropol'zovanie. – 2025. – № 1. – DOI 10.13140/RG.2.2.33094.59201.

The concentration of major soluble ions in the ice core of the pingo at the Pestsovoye gas field, in the Evoyakha River valley of southern Tazovsky Peninsula, Northwestern Siberia

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, office 2009

✉ vasilch_geo@mail.ru

Abstract. The author describes more than 20 pingos at the Pestsovoye gas field, located 10-15 km north of the Tundra station, 98-103 km from the town of Novy Urengoy. The investigated pingo's height ranges from 15 to 20 meters, and its diameter is 150 to 200 meters. Most often, the profile of these formations features a lower part – a pedestal, approximately 5-7 m high—over which the main hill rises in a dome-like shape. More thorough dating of the overlying peat was done on one of the 17-meter-tall hills, which is 10 kilometers north of the Tundra station (29–30 kilometers after the turn to Pestsovoye from the main highway leading from Novy Urengoy). The results showed that these pingos formed relatively recently, at least not earlier than 2,500 years BP. This timing suggests that the geological processes leading to their formation may have been influenced by climatic changes in the region. Understanding the age and development of these structures can provide insights into past environmental conditions and inform predictions about future landscape evolution in response to ongoing climate shifts. Peat covering the middle part of the hill and the area close to the pedestal's base was sampled in order to establish the pingo's age. In the winter of 2013, ice samples were taken from the pingo core. With a detection limit of 0.02 mg/L for chloride ions, the ion chromatograph "Stayer" (Russia) was used to measure the macro-component composition of the ice. Radiocarbon dating of the peat showed a relatively young age of the overlying peat in different parts of the hill. In the central part of the pingo, surface peat is dated at 2560 ± 70 BP, peat from a depth of 0.3-0.4 m is dated at 5220 ± 50 BP, and peat from a depth of 0.85-0.9 m has an age of 5080 ± 50 BP. On the pedestal, peat from a

depth of 0.05-0.15 m is dated at 5400 ± 40 BP. In the ice core of the pingo were determined ions of potassium, sodium, calcium, magnesium, chlorine, sulfates, and nitrates. Among the anions, the chlorine ion predominates (from 0.6 to 3.3 mg/L), followed by the sulfate ion (from 0.3 to 1 mg/L). The ratio of chlorine ions to sulfate ions varies from 0.7 to 3.7, averaging 1.7.

Keywords: northwestern Siberia, cations, macroelements, pingo, ice core, permafrost, Pestsovoe, Evoyakha River, anions, soluble ions

References (transliterated)

1. Alexeev S.V., Alexeeva L.P. Ground ice in the sedimentary rocks and kimberlites of Yakutia, Russia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2002. Vol. 13. Pp. 53-59. doi:10.1002/ppp.408. EDN: LHNHQB.
2. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Kononov A.M. Trace elements and rare earth elements in ground ice in kimberlites and sedimentary rocks of Western Yakutia // *Cold Regions Science and Technology*. 2016. Vol. 123. Pp. 140-148. doi:10.1016/J.COLDREGIONS.2015.10.008. EDN: WPYNWX.
3. Plashchev A.V. Vzryv ledyanogo bugra // *Priroda*. 1956. № 9. S. 113.
4. Bogomolov N.S., Sklyarevskaya A.N. O vzryvakh gidrolakkolitov v yuzhnoi chasti Chitinskoi oblasti // *Naledi Sibiri*. M.: Nauka, 1969. S. 127-130.
5. Mackay J.R. Pingo growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula area, Western Arctic coast, Canada: a long-term field study // *Geographie Physique et Quaternaire*. 1998. Vol. 52. N 3. Pp. 271-323. doi:10.7202/004847ar.
6. Svensson H. Pingos yttre delen av Adventdalen // *Norsk Polaristitut Årbok*. 1969. 1970. P. 168-174.
7. Müller F. Analysis of some stratigraphic observations and radiocarbon dates from two pingos in the Mackenzie Delta area, N.W.T. // *Arctic*. 1962. Vol. 15. Pp. 279-288.
8. Mackay J.R. Growth of Ibyuk Pingo, Western Arctic Coast, Canada, and some implications for environmental reconstructions // *Quatern. Res.* 1986. Vol. 26. Iss. 1. Pp. 68-80.
9. Olson E.A., Broecker W.S. Lamont natural radiocarbon measurements V // *American Journal of Science*. 1959. Vol. 257. N 1. Pp. 1-11.
10. Tolstikhin N.I. Podzemnye vody Zabaikal'ya i ikh gidrolakkolity // *Trudy Komissii po izucheniyu vechnoi merzloty*. T. 1. L.: Izd-vo AN SSSR, 1932. S. 29-50.
11. Andreev V.N. Gidrolakkolity (bulgunnyakhi) v Zapadno-Sibirskikh tundrach // *Izvestiya Gosudarstvennogo geograficheskogo obshchestva*. 1936. T. 68. Vyp. 2. S. 40-47.
12. Minaev A.N. Krupnye gidrolakkolity v Zapadno-Sibirskoi nizmennosti // *Mnogoletnemerzlye gornye porody razlichnykh raionov SSSR*. M.: Izd-vo AN SSSR, 1963. S. 120-125.
13. Solov'ev P.A. Bulgunnyakhi tsentral'noi Yakutii // *Issledovaniya vechnoi merzloty v Yakutskoi respublike*. Vyp. 3. M.: Izd-vo AN SSSR, 1952. S. 226-258.
14. Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A. Radiouglerodnoe opredelenie vozrasta bulgunnyakha na mestorozhdenii Pestsovoe v severnoi chasti Zapadnoi Sibiri // *Inzhenernaya geologiya*. 2010. № 2. S. 16-23.
15. Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Yoshikawa K., Podborny Ye.Ye., Chizhova Ju.N. Isotope composition of pingo ice core in the Yevo-Yakha River valley, north-west Siberia // *Earth's Cryosphere (Kriosfera Zemli)*. 2014. Vol. 18. N 4. Pp. 41-51.

16. Vasil'chuk Yu.K., Lawson D.E., Yoshikawa K., Budantseva N.A., Chizhova Ju.N., Podborny Ye.Ye., Vasil'chuk A.C. Stable Isotopes in the closed-system Weather Pingo, Alaska and Pestsovoye Pingo, northwestern Siberia // *Cold Regions Science and Technology*. 2016. Vol. 128. Pp. 13-21. doi:10.1016/j.coldregions.2016.05.001. EDN: WWHCBP.
17. Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Rogov V.V., Podborny Ye., Chizhova Ju.N. New Data on Variations of Stable Isotopes in the Pingo Ice Core in the Southern Part of the Tazovsky Peninsula // *Doklady Earth Sciences*. 2017. Vol. 472, Part 2. Pp. 200-204. DOI: 10.1134/S1028334X17020064 EDN: DUYIIF.
18. Chizhova Yu.N., Vasil'chuk Yu.K. Izotopnaya indikatsiya uslovii obrazovaniya ledyanogo yadra bulgunnyakhov (pingo) // *Led i sneg*. 2018. T. 58. № 4. S. 507-523. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-4-507-523 EDN: VQLHON.
19. Vasil'chuk Yu.K., Chizhova Ju.N., Budantseva N.A., Kurchatova A.N., Rogov V.V., Vasil'chuk A.C. Stable oxygen and hydrogen isotope compositions of the Messoyakha and Pestsovoe pingos as markers of ice core formation // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2021. Vol. 32. N 4. Pp. 558-572.
20. *Geokriologicheskie usloviya Zapadno-Sibirskoi gazonosnoi provintsii* / Tagunova L.N., Mel'nikov E.S., Goral'chuk M.I., Kritsuk L.N. i dr.; Otv. red. E.S. Mel'nikov. Novosibirsk: Nauka, 1983. 193 s.
21. Andreev Yu.F. O svyazi lineino-gryadovogo rel'efa s tektonicheskimi strukturami na severe Zapadnoi Sibiri (v oblasti razvitiya mnogoletnei merzloty) // *Geologiya i geokhimiya*. 1960. Vyp. 3 (IX). S. 76-94.
22. Trofimov V.T., Badu Yu.B., Kudryashov V.G., Firsov N.G. *Poluostrov Yamal (inzhenerno-geologicheskii ocherk)* / Pod red. V.T. Trofimova. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1975. 245 s.
23. Anisimova N.P., Karpov E.G. *Khimicheskii sostav in'ektsionnogo l'da* // *Geokriologicheskie i gidrogeologicheskie issledovaniya Yakutii*. Yakutsk, 1978. S. 125-137. EDN: VXZQMR.
24. Walker D.A., Walker M.D., Everett K.R., Weber P.J. Pingos of the Prudhoe Bay region, Alaska // *Arctic and Alpine Research*. 1985. Vol. 17. Pp. 321-336.
25. Trofimov V.T., Badu Yu.B., Vasil'chuk Yu.K., Firsov N.G. i dr. *Ekzogedodinamika Zapadno-Sibirskoi plity (prostranstvenno-vremennye zakonomernosti)* / Pod red. V.T. Trofimova. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1986. 246 s. EDN: UTIFMZ.
26. Mackay J.R. Pingo collapse and paleoclimatic reconstruction // *Canadian Journal of Earth Sciences*. 1988. N 25(4). Pp. 495-511.
27. Trofimov V.T., Vasil'chuk Yu.K., Baulin V.V. i dr. *Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir'*. M.: Nedra, 1989. 454 s.
28. Mackay J.R. Seasonal growth bands in pingo ice // *Canadian Journal of Earth Sciences*. 1990. Vol. 27. N 8. Pp. 1115-1125.
29. Butvilovskii V.V. *Paleogeografiya poslednego oledeneniya i golotsena Altaya: sobytiino-katastroficheskaya model'*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo un-ta, 1993. 252 s.
30. Mackay J.R. Pingo growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula area, Western Arctic coast, Canada: a long-term field study // *Geographie Physique et Quaternaire*. 1998. Vol. 52. N 3. Pp. 271-323.
31. Blyakharchuk T.A., Wright H.E., Borodavko P.S., van der Knaap W.O., Ammann B. The role of pingos in the development of the Dzhangyskol lake-pingo complex, central Altai Mountains, southern Siberia // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2008. Vol. 257. Iss. 4. Pp. 404-420. DOI: 10.1016/j.palaeo.2007.09.015. EDN: LLBOGL.
32. Grosse G., Jones B.M. Spatial distribution of pingos in northern Asia // *The Cryosphere*.

2011. Vol. 5. Pp. 13-33. DOI: 10.5194/tc-5-13-2011. EDN: RKEZCB.
33. Mackay J.R., Burn C.R. A century (1910-2008) of change in a collapsing pingo, Parry Peninsula, Arctic coast, Canada // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2011. Vol. 22. Pp. 262-272.
 34. Jones B.M., Grosse G., Hinkel K.M., Arp C.D., Walker S., Beck R.A., Galloway J.P. Assessment of pingo distribution and morphometry using an IfSAR derived digital surface model, western Arctic Coastal Plain, Northern Alaska // *Geomorphology*. 2012. Vol. 138. Iss. 1. Pp. 1-14.
 35. Yoshikawa K., Lawson D., Sharkhuu N. Stable Isotope Composition of Ice Core in Open- and Closed-System Pingos // *Permafrost, Tenth International Conference, Proceedings / Ed.: K.M. Hinkel. Salekhard, 25-29 June 2012*. Vol. 1. Salekhard: The Northern Publisher, Russia, 2012. Pp. 473-478.
 36. Yoshikawa K., Sharkhuu N., Sharkhuu A. Ground water hydrology and stable isotope analysis of an open-system pingo in Northwestern Mongolia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2013. Vol. 24. N 3. Pp. 175-183.
 37. Samsonov S.V., Lantz T.C., Kokelj S.V., Zhang Y. Growth of a young pingo in the Canadian Arctic observed by RADARSAT-2 interferometric satellite radar // *The Cryosphere*. 2016. Vol. 10. Pp. 799-810. doi:10.5194/tc-10-799-2016.
 38. Ishikawa M., Yamkhin J. Formation Chronology of Arsain Pingo, Darhad Basin, Northern Mongolia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2016. Vol. 27(3). Pp. 297-306. doi:10.1002/ppp.1877. EDN: XTRQEF.
 39. Wetterich S., Schirrmeister L., Nazarova L., Palagushkina O., Bobrov A., Pogosyan L., Savelieva L., Syrykh L., Matthes H., Fritz M., Gunther F., Opel T., Meyer H. Holocene thermokarst and pingo development in the Kolyma Lowland (NE Siberia) // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2018. Vol. 29(3). Pp. 182-198. doi:10.1002/ppp.1979. EDN: YBXYTR.
 40. Vasil'chuk Yu.K., Kurchatova A.N., Budantseva N.A., Rogov V.V., Chizhova Ju.N. Variations of Stable Oxygen and Hydrogen Isotopes in the Ice Core of the Pingo (Southern Part of Gydan Peninsula) // *Doklady Earth Sciences*. 2019. Vol. 488(1). Pp. 1137-1141. doi:10.1134/S1028334X19090319. EDN: HNBYJL.
 41. Demidov N., Wetterich S., Verkulich S., Ekaykin A., Meyer H., Anisimov M., Schirrmeister L., Demidov V., Hodson A.J. Geochemical signatures of pingo ice and its origin in Grøndalen, west Spitsbergen // *The Cryosphere*. 2019. Vol. 13. Pp. 3155-3169. doi:10.5194/tc-13-3155-2019. EDN: YQYJMU.
 42. Demidov V., Wetterich S., Demidov N., Schirrmeister L., Verkulich S., Koshurnikov A., Gagarin V., Ekaykin A., Terechov A., Veres A., Kozachek A. Pingo drilling reveals sodium-chloride dominated massive ice in Grøndalen, Spitsbergen // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2021. Vol. 32. Pp. 572-586. doi:10.1002/ppp.2124. EDN: FTIDYM.
 43. Demidov V.E., Demidov N.E., Verkulich S.R., Wetterich S. Distribution of pingos on Svalbard // *Geomorphology*. 2022. Vol. 412. 108326. doi:10.1016/j.geomorph.2022.108326. EDN: MIYSDX.
 44. Demidov N.E., Gunar A.Yu., Balikhin E.I., Gagarin V.E., Guzeva A.V., Dezhnikova A.A., Kazantsev V.S., Koshurnikov A.V., Narizhnaya A.I. Stroenie, gazosoderzhanie i termicheskoe sostoyanie mnogoletnikh bugrov pucheniya (bulgunnyakhov) v doline r. Vas'-Yugan (okrestnosti g. Salekhard, Zapadnaya Sibir') // *Geofizicheskie protsessy i biosfera*. 2022. T. 21, № 3. S. 27-38. DOI: 10.21455/GPB2022.3-4 EDN: LARSFO.
 45. Wolfe S.A., Morse P.D., Parker R., Marcus R., Phillips M.R. Distribution and morphometry of pingos, western Canadian Arctic, Northwest Territories, Canada //

Geomorphology. 2023. Vol. 431. 108694. doi:10.1016/j.geomorph.2023.108694. EDN: MGEOMX.

46. Gutareva O.S., Ivanov E.V., Buddo I.V., Kononov A.M., Misyurkeeva N.V., Shelokhov I.A., Shein A.N., Kraev G.N., Smirnov A.S. Proiskhozhdenie l'dov bugrov pucheniya v raione reki Erkuta-yakha (p-ov Yamal) po rezul'tatam issledovaniya izotopnykh sootnoshenii δD i $\delta^{18}O$ // Geodynamics & Tectonophysics. 2024. 15 (6). 0800. doi:10.5800/GT-2024-15-6-0800. EDN: NVREKB.
47. Sharin V.V. Pingo (gidrolakolity) v doline Vudfiorddalen (ostrov Zapadnyi Shpitsbergen): morfologicheskie osobennosti, vozrast, usloviya formirovaniya // Rel'ef i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii, vypusk 11. 2024. S. 412-424. doi:10.24412/2687-1092-2024-11-412-424. EDN: IWFVXX.
48. Paull C.K., Hong J.K., Caress D.W., Gwiazda R., Kim J.-H., Lundsten E., Paduan J.B., Jin J.K., Duchene M.J., Rhee T.S., Brake V., Obelcz J., Walton M.A.L. Massive ice outcrops and thermokarst along the Arctic shelf edge: By products of ongoing groundwater freezing and thawing in the subsurface // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2024. Vol. 129, e2024JF007719. doi:10.1029/2024JF007719. EDN: EUXURP.
49. Demidov V.A. Gidrolakkolity arhipelaga Shpitsbergen / Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata geograficheskikh nauk. M., 2024. 27 s.
50. Liu G., Xiao Y., Hu G., Wu T., Wu X., Wang L., Xie C., Zou D., Du E., Zhao Y., Lu Y., Zhao L. The surface features and internal structure of an integrated open system pingo in the source area of the Yangtze River on the Qinghai-Tibet Plateau // Catena. 2025. Vol. 255. 109070. doi:10.1016/j.catena.2025.109070.
51. Anisimova N.P. Kriogidrogeokhimicheskie osobennosti merzloi zony. Novosibirsk: Nauka, 1981. 153 s. EDN: RVILON.

Yakutsk Complex Expedition of the USSR Academy of Sciences 1925–1930 and Issues of Permafrost Studying

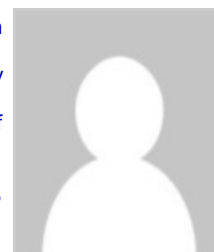
Suleymanov Aleksandr Albertovich

PhD in History

Senior Researcher, Institute for Humanities Research and Indigenous Studies of the North of 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 paper examines a poorly studied aspect of the implementation of the largest in scale and objectives scientific research initiative of its time – the Yakut complex expedition of the USSR Academy of Sciences in 1925-1930. The objective of the study is to reconstruct the history of accumulation of information by the participants of this expedition concerning understanding of the phenomenon of permafrost. Based on materials found in archival and museum collections of the cities of Moscow, St. Petersburg and Yakutsk, including those introduced into scientific circulation for the first time, and the use of documents published based on the results of the expedition, the history of research conducted in the Shergin mine in Yakutsk is shown. The most representative conclusions made by researchers during their work in a number of administrative districts of the Yakut ASSR, primarily as part of agricultural detachments, are presented. In methodological terms, this article is based mainly on the application of special historical approaches to scientific knowledge: the principle of

historicism, historical-typological, historical-comparative and historical-genetic methods. As a result of the studies, the history of accumulation of information on permafrost by the participants of the Yakut complex expedition is presented, conclusions are made on the significance of the research performed. In this regard, it was established that despite the absence of a specialized geocryological squad, an unsuccessful attempt to organize a systematic scientific study of the phenomenon of permafrost, the expedition participants received a set of important information characterizing the specifics and scale of some cryogenic processes. In particular, they indicate significant thermokarst activity within agricultural lands in the first quarter of the twentieth century. Of considerable interest are also the examples of traditional knowledge of the rural population of Yakutia noted by the participants of the Yakutsk complex expedition regarding some features of the formation of thermokarst landforms, which for the first time in historiography made it possible to make certain comparisons regarding the degree of correspondence with modern ideas about cryogenic processes.

Keywords: intellectual development, history of science, thermokarst, Shergin mine, complex expedition, geocryology, permafrost, The USSR Academy of Sciences, Yakutia, Arctic

References (transliterated)

1. Arkhiv Rossiiskoi akademii nauk. F. 582. Op. 5. D. 95.
2. Boyakova S.I. Materialy severnykh otryadov Yakutskoi ekspeditsii AN SSSR 1925-1930 gg. kak istochnik po istorii nauchnogo osvoeniya Arktiki // Arktika i Sever v sovremennykh gumanitarnykh issledovaniyakh: Sbornik nauchnykh statei. Yakutsk: IGIIPMNS SO RAN, 2018. S. 8-17. DOI: 10.25693/571.56.985.2018_002. EDN: YXPPXV.
3. Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. Monitoring teplovogo rezhima gruntov Tsentral'noi Yakutii. Yakutsk: IMZ SO RAN, 2021. 156 s.
4. Vinokurova L.I. Rukopis' I.P. Soikkonena v aspekte izucheniya zimnei povsednevnosti yakutov pervoi treti KhKh v. // Oriental Studies. 2022. T. 15, № 3. S. 501-518. DOI: 10.22162/2619-0990-2022-61-3-501-518. EDN: UBGFNL.
5. Vinokurova L.I. Issledovatel' Anabara P. V. Sleptsov: chelovek i sud'ba // Anabarskii ulus: Istoriya. Kul'tura. Fol'klor. Yakutsk: Bichik, 2005. S. 87-94.
6. Vittenburg E.P. Komissiya Akademii nauk po izuchenyu proizvoditel'nykh sil Yakutskoi ASSR (1925-1930 gg.). Organizatsiya i metodika raboty. Yakutsk: Bichik, 2008. 200 s.
7. Vittenburg P.V. Yakutskaya ekspeditsiya Akademii nauk. L., 1925. 157 s.
8. Goryushkin L.M. Yakutskaya kompleksnaya ekspeditsiya // Vestnik Rossiiskoi akademii nauk. 1996. № 5. S. 458-462.
9. Grigor'ev A.A. Morfologiya severovostochnoi chasti Vilyuiskogo okruga. Otchet Vilyuiskogo otryada Yakutskoi ekspeditsii Akademii Nauk SSSR v 1926 g. pod nachal'stvom A.A. Grigor'eva. L.: AN SSSR, 1930. 167 s.
10. Desyatkin R.V. Pochvennye issledovaniya yakutskoi ekspeditsii AN SSSR v 1925-1930 gg. // Vestnik Yakutskogo gosudarstvennogo universiteta. 2005. № 2. S. 20-24. EDN: JXOGCP.
11. Ermolaeva Yu.N. M.K. Ammosov i organizatsiya yakutskoi ekspeditsii AN SSSR // Vestnik Yakutskogo gosudarstvennogo universiteta. 2005. № 1. S. 12-16. EDN: JXOFUD.
12. Ermolaeva Yu.N. Yakutskaya kompleksnaya ekspeditsiya 1925-1930 gg.: razvitie nauki v Yakutii. Novosibirsk: Nauka, 2001. 162 s.
13. Zheleznyak M.N., Klimovskii I.V., Shepelev V.V. Vklad akademika A.F. Middendorfa v

- stanovlenie geokriologicheskoi nauki // Istoriya nauk o Zemle: Sbornik statei. Vyp. 5 / Pod red. V.A. Snytko, V.A. Shirokovoi. M.: OOO "Akkolit", 2016. S. 15-21. EDN: TMRWFW.
14. Kamenskii R.M. Merzlotnye issledovaniya Yakutskoi ekspeditsii AN SSSR // Itogi i razvitie issledovaniy Yakutskoi ekspeditsii Akademii nauk: materialy nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 70-letiyu sozdaniya Yakutskoi kompleksnoi ekspeditsii Akademii nauk SSSR (Yakutsk, 1 dekabrya 1995 g.) / otv. red.: d.t.n. V.A. Sherstov. Yakutsk: YaNTs SO RAN, 1996. S. 61-66.
 15. Krasnyuk A.A. Pochvy Lensko-Amginskogo vodorazdela (Yakutskii okrug). Otchet Aldanskogo otryada Yakutskoi ekspeditsii Akademii nauk SSSR v 1925 g. pod nachal'stvom A.A. Grigor'eva. L.: AN SSSR, 1927. 176 s.
 16. Middendorf A.F. Puteshestvie na sever i vostok Sibiri. Ch. 1. Otd. 1. SPb: Tip. Imperatorskoi Akademii nauk, 1860. 188 s.
 17. Nedrigailov S.N. Lesnye resursy Lensko-Aldanskogo plato i Zaaldano-Verkhoyanskogo gornogo raiona. L.: Izd-vo AN SSSR, 1928. 468 s.
 18. Nikolaev V.P. Mediko-sanitarnyi otryad Yakutskoi ekspeditsii AN SSSR (1925-1926 gg.) // Nauka i obrazovanie. 2006. № 2. S. 133-136.
 19. Sankt-Peterburgskii filial Arkhiva RAN (SPbF ARAN). F. 47. Op. 1. D. 927.
 20. SPbF ARAN. F. 47. Op. 2. D. 14.
 21. SPbF ARAN. F. 47. Op. 2. D. 53.
 22. Solov'ev P.A. Kriolitozona severnoi chasti Leno-Amginskogo mezhdurech'ya. M.: AN SSSR, 1959. 144 s.
 23. Solomonov N.G. Zoologicheskie issledovaniya Yakutskoi ekspeditsii AN SSSR (1925-1930) // Vestnik Yakutskogo gosudarstvennogo universiteta. 2005. № 2. S. 37-42. EDN: JXOGDT.
 24. Suleimanov A.A., Vinokurova L.I., Lytkin V.M. i dr. Antropologiya kholoda: estestvennye nizkie temperatury v sisteme zhizneobespecheniya sel'skikh soobshchestv Yakutii (traditsionnye praktiki, vyzovy sovremennosti i strategii adaptatsii). Novosibirsk: Nauka, 2024. 280 s. EDN: ODSKNR.
 25. Sumgin M.I. Vechnaya merzlota pochvy v predelakh SSSR. Vladivostok: DVGO, 1927. 381 s.
 26. Fedorov A.N. Evolyutsiya i dinamika merzlotnykh landshaftov Yakutii. Diss. dokt. geogr. nauk. Yakutsk, 2020. 302 s.
 27. Shepelev V.V. Osnovopolozhnik merzlotovedeniya professor M. I. Sumgin v Yakutii // Nauka i tekhnika v Yakutii. 2013. № 2. S. 48-52. EDN: MHRBQE.
 28. Shirina D.A. Deyatel'nost' geomorfologicheskogo otryada Yakutskoi akademicheskoi kompleksnoi ekspeditsii v kontekste istorii Kolym'skogo kraia. 1929–1930 gg. // Severo-Vostochnyi gumanitarnyi vestnik. 2011. № 2. S. 18-25. EDN: PBSBOZ.
 29. Shreiber S.E. Mediko-sanitarnoe obsledovanie naseleniya Vilyuiskogo i Olekmin'skogo okrugov. L.: Izd-vo AN SSSR, 1931. 372 s.
 30. Lytkin V., Suleymanov A., Vinokurova L. et al. Influence of Permafrost Landscapes Degradation on Livelihoods of Sakha Republic (Yakutia) Rural Communities // Land. 2021. № 10. R. 101. DOI: 10.3390/land10020101. EDN: OGSXAB.

Engineering and geocryological assessment of the impact of mineral extraction on permafrost degradation within the Arctic cryolithozone of Russia

Stupin Oleg Gennad'evich

Graduate student; Department of Digital Management Technologies; Siberian Federal University
660041, Russia, Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk, Oktyabrsky district, Svobodny Prospekt, 79

✉ ipdme@mail.ru

**Vakhrusheva Inna Alekseevna**

PhD in Pedagogy

Associate Professor; Department of Higher Mathematics; Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev
Agricultural Academy

49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434

✉ vakhrusheva@rgau-msha.ru

**Pchelintseva Svetlana Viacheslavovna**

PhD in Technical Science

Associate Professor; Department of Applied Informatics; Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev
Agricultural Academy

49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434

✉ pchelintseva@inbox.ru

**Krasovskaya Lyudmila Vladimirovna**

PhD in Technical Science

Associate Professor; Department of Applied Informatics; Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev
Agricultural Academy

49 Timiryazevskaya str., Moscow, 127434, Russia

✉ kraslud@yandex.ru



Abstract. The present study focuses on the engineering and geocryological assessment of the thermal impact of mineral extraction activities on the degradation of permafrost within the Arctic cryolithozone of Russia. The research is centered on the Yunyaginsky coal strip mine and adjacent underground mines of the Pechora coal basin, including Vorgashorskaya, Vorkutinskaya, and Zapolyarnaya. These mining facilities are located in regions characterized by widespread permafrost and are subject to increasing anthropogenic pressure from thermal emissions associated with open-pit and underground coal extraction. The study examines how persistent thermal loads from mining infrastructure, spoil heaps, and ventilation emissions contribute to active layer deepening, moisture redistribution, and strength loss in frozen soils. The assessment accounts for the spatial variability of thermal anomalies and their correlation with operational factors, such as excavation intensity, ventilation flow rates, and drainage water temperature.

The study uses a combination of field-based temperature monitoring, geotechnical borehole sampling, laboratory testing of permafrost samples, and numerical modeling of heat transfer processes to evaluate the extent and rate of permafrost degradation under thermal stress. The scientific novelty of the research lies in the quantitative characterization of thermal fields generated by mining operations in Arctic permafrost conditions and the identification of threshold conditions under which permafrost degradation accelerates. Numerical simulations and empirical data indicate that under a thermal load density exceeding 100 W/m², permafrost thawing reaches depths of 3–4 meters over five years. Field observations revealed that the maximum depth of seasonal thawing doubled in the impact zone compared to

background sites, reaching 2.8 meters. Additionally, localized permafrost loss was documented in areas near spoil heaps and mine water discharge zones, where ground temperatures exceeded 0 °C and moisture content rose above 35%. The findings underscore the necessity for thermoprotective engineering measures, such as insulated platforms, passive thermosiphons, and automated thermal monitoring systems, to mitigate infrastructure risks and ensure sustainable mining operations in Arctic environments.

Keywords: engineering infrastructure, heat transfer, geocryology, Pechora coal basin, Yunyaginsky mine, coal mining, thermal impact, permafrost degradation, permafrost, Arctic

References (transliterated)

1. Walter K.M., Chanton J.P., Chapin F.S. III, Schuur E.A.G., Zimov S.A. Methane production and bubble emissions from Arctic lakes: Isotopic implications for source pathways and ages // *Journal of Geophysical Research*. 2006. Vol. 111, G03003.
2. Mikhailova I.A., Petrova E.V. Issledovanie nakoplennoy ekologicheskoy ushcherby ot dobychi uglya na uchastkakh Pechorskogo kamennougol'nogo basseina po dannym distantsionnogo zondirovaniya // *Ekologicheskii monitoring i okhrana okruzhayushchei sredy*. 2022. № 4. S. 33-40.
3. Seasonal Increase of Methane Emissions Linked to Warming Permafrost // *Nature Climate Change*. 2022. URL: <https://www.nature.com/articles/s41558-022-01512-4> (data obrashcheniya: 15.05.2025).
4. Kuz'mina O.A., Solov'ev A.A. Ugol'naya promyshlennost' i ekologiya: balans ili disbalans // *Ekonomika i ekologiya prirodopol'zovaniya*. 2021. № 3. S. 45-52.
5. Sidorov V.P., Ivanova N.S. Klimaticheskie osobennosti i statisticheskie otsenki izmeneniya elementov klimata v raionakh vечноy merzloty na territorii Severa Rossii // *Klimat i ekologiya*. 2023. № 2. S. 15-22.
6. Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C., et al. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. Vol. 520, pp. 171-179. DOI: 10.1038/nature14338 EDN: UFRKWZ.
7. Aleksandrov D.M., Kuznetsova T.I. Ekologiya ugot'noi promyshlennosti: sostoyanie, problemy, puti resheniya // *Geoekologiya*. 2020. № 5. S. 60-68.
8. Petrov I.V. Snizhenie zagryazneniya okruzhayushchei sredy otkhodami obogashcheniya na shakhtakh Pechorskogo ugot'nogo basseina : dis. ... kand. tekhn. nauk. Moskva, 2019. 148 s. EDN: QLYKXI.
9. Pfeiffer E.-M., Grigoriev M.N., Liebner S., Beer C., Knoblauch C. Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost // *Nature Climate Change*. 2018. Vol. 8, pp. 309-312. DOI: 10.1038/s41558-018-0095-z EDN: XXLNTN.
10. Turetsky M.R., Abbott B.W., Jones M.C., Walter Anthony K., Olefeldt D., Schuur E.A.G., Grosse G., Kuhry P., Hugelius G., Lawrence D.M., Gibson C., Sannel A.B.K., McGuire A.D. Carbon release through abrupt permafrost thaw // *Nature Geoscience*. 2020. Vol. 13, pp. 138-143. DOI: 10.1038/s41561-019-0526-0 EDN: ZVQSNT.
11. Nikolaev S.A., Orlova E.M. Sovremennoye izmeneniye klimata i reaktsiya kriolitozony na primere Zapadnoi Sibiri i Evropeiskogo Severa Rossii // *Klimatologiya i geografiya*. 2021. № 3. S. 25-32.
12. Ivanov K.V., Sokolova M.A. Vliyanie izmeneniya klimata na vechnyuyu merzlotu i inzhenernyuyu infrastrukturu Krainego Severa : dis. ... kand. tekhn. nauk. Sankt-Peterburg, 2020. 152 s.
13. Arctic Industrialization: How Will It Impact Delicate Ecosystems? // *Earth.com*. 2024.

- URL: <https://www.earth.com/news/arctic-industrialization-how-will-it-impact-delicate-ecosystems/> (data obrashcheniya: 15.05.2025).
14. Walker T.R., Crittenden P.D., Dauvalter V.A., Jones V., Kuhry P., Mikkola K., Nikula A., Patova E., Ponomarev V.I., Pystina T., Rätti O., Solovieva N., Stenina A., Virtanen T., Young S.D. Multiple indicators of human impacts on the environment in the Pechora Basin, north-eastern European Russia // *Ecological Indicators*. 2009. Vol. 9, pp. 765-779. DOI: 10.1016/j.ecolind.2008.09.008 EDN: LLYBWZ.
 15. Semenov P.I., Kozlova N.V. Vliyanie zagryaznyayushchikh veshchestv, popadayushchikh v pochvu, na sostoyanie okruzhayushchei sredy v raionakh ugledobychi // *Ekologicheskaya bezopasnost'*. 2021. № 4. S. 55-62.
 16. Lantuit H., Pollard W.H., Couture N.J., Fritz M., Schirmer L., Meyer H., Hubberten H.-W. Coastal erosion driven by climate change and its impact on permafrost degradation in the Arctic // *Geophysical Research Letters*. 2012. Vol. 39, L22402.
 17. A Transdisciplinary, Comparative Analysis Reveals Key Risks from Permafrost Thaw // *Communications Earth & Environment*. 2024. URL: <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01883-w> (data obrashcheniya: 15.05.2025).
 18. Morozova E.S., Lebedev A.Yu. Ekonomicheskaya otsenka posledstviy degradatsii vечноi merzloty pod vliyaniem izmenenii klimata dlya ustoichivosti dorozhnoi infrastruktury v Rossiiskoi Arktike // *Ekonomika i upravlenie*. 2023. № 2. S. 30-38.
 19. Rapidly Increasing Industrial Activities in Arctic // *ScienceDaily*. 2024. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2024/10/241021170349.htm> (data obrashcheniya: 15.05.2025).
 20. Koven C.D., Lawrence D.M., Riley W.J. Permafrost carbon-climate feedback is sensitive to deep soil carbon decomposability but not deep soil nitrogen dynamics // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2015. Vol. 112, pp. 3752-3757.
 21. Natali S.M., Schuur E.A.G., Mauritz M., Schade J.D., Celis G., Crummer K.G., Johnston C., Krapek J., Pegoraro E., Salmon V.G., Webb E.E., Wilson C.J. Permafrost thaw and soil moisture driving CO₂ and CH₄ release from upland tundra // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2015. Vol. 120, pp. 525-537. DOI: 10.1002/2014JG002872 EDN: RQPVXI.
 22. Is Methane Release from the Arctic Unstoppable? // *MIT Climate Portal*. 2024. URL: <https://climate.mit.edu/ask-mit/methane-release-arctic-unstoppable> (data obrashcheniya: 15.05.2025).
 23. Zimov S.A., Schuur E.A.G., Chapin F.S. Permafrost and the global carbon budget // *Science*. 2006. Vol. 312, pp. 1612-1613. DOI: 10.1126/science.1128908 EDN: LJZGOT.
 24. Tarasov A.N., Smirnova L.P. Razvitie ugledobychi v Pechorskom basseine: potentsial, perspektivy, vozmozhnosti // *Gornaya promyshlennost'*. 2022. № 6. S. 40-47.
 25. Schädel C., Bader M.K.-F., Schuur E.A.G., Biasi C., et al. Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils // *Nature Climate Change*. 2016. Vol. 6, pp. 950-953. DOI: 10.1038/nclimate3054 EDN: XTUBUV.
 26. Thawing Permafrost: What Does It Mean? And What Can Be Done? // *Salata Institute, Harvard University*. 2024. URL: <https://salatainstitute.harvard.edu/thawing-permafrost-what-does-it-mean-and-what-can-be-done/> (data obrashcheniya: 15.05.2025).
 27. Trace Metals in Surface Water of the Pechora River and Its Tributaries // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X23007518> (data obrashcheniya: 15.05.2025).

28. Thawing Permafrost Releases Industrial Contaminants into Arctic // Environmental Health Perspectives. 2023. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10971047/> (data obrashcheniya: 15.05.2025).
29. NASA Helps Find Thawing Permafrost Adds to Near-Term Global Warming // NASA Jet Propulsion Laboratory. 2024. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasa-helps-find-thawing-permafrost-adds-to-near-term-global-warming/> (data obrashcheniya: 15.05.2025).
30. The Arctic Is a Freezer That's Losing Power // WIRED. 2023. URL: <https://www.wired.com/story/the-arctic-is-a-freezer-thats-losing-power/> (data obrashcheniya: 15.05.2025).
31. This Critical Ecosystem Helped Keep Climate Change in Check. Now It's Making Things Worse // Vox. 2024. URL: <https://www.vox.com/climate/390530/arctic-tundra-carbon-sink-emitter-climate-change> (data obrashcheniya: 15.05.2025).
32. Arctic Tundra Is Now Emitting More Carbon Than It Absorbs, US Agency Says // The Guardian. 2024. URL: <https://www.theguardian.com/world/2024/dec/10/arctic-tundra-carbon-shift> (data obrashcheniya: 15.05.2025).

The mechanism of methane emissions during surface freeze in autumn

Li Chenzheng

Postgraduate student; Department of Geocryology, Lomonosov Moscow State University

119234, Russia, Moscow, Ramenki district, ter. Leninskie Gory, 1

✉ lichenzheng0912@gmail.com



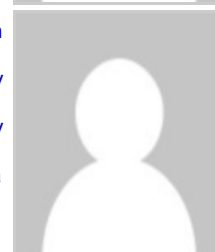
Brushkov Anatolii Viktorovich

Doctor of Geology and Mineralogy

Head of the Department; Department of Geocryology, Lomonosov Moscow State University

1 Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia

✉ brouchkov@hotmail.com



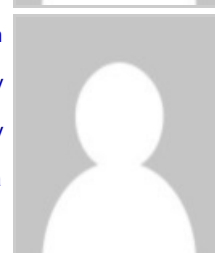
Cheverev Viktor Grigor'evich

Doctor of Geology and Mineralogy

Head of the Department; Department of Geocryology, Lomonosov Moscow State University

1 Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia

✉ cheverev44@mail.ru



Lo Yn'han

Postgraduate student; Department of Geocryology, Lomonosov Moscow State University

1 Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia

✉ lyhmsu@mail.ru



Sokolov Andrei Vladimirovich

Chief Engineer - leading specialist in gas analytical equipment (instruments); LLC 'NIIT'

Kulakova, 20, Moscow, 123592, Russia

✉ sok44@yandex.ru



Abstract. Currently, one of the global environmental problems is global warming caused by increased concentrations of greenhouse gases in the atmosphere. Methane is one of the key gases that affect climate change. Methane concentrations in the atmosphere have increased significantly over the past 20 years and continue to increase to this day. Scientists and politicians around the world are concerned about this problem and are looking for ways to solve global warming. Under the general trend of global warming, the study of the characteristics of methane emissions in frozen rocks is of great significance for accurately assessing and predicting the content of greenhouse gases in the atmosphere. The subject of this study is the mechanism of methane emission during surface freezing in autumn. The object of this study is methane emission under freezing conditions. In this paper, a unique software package Solidworks is considered as a method for studying methane emissions, which suggests its use in such areas as engineering geology, permafrost, soil science, etc. The scientific novelty of this study is that it develops the mechanisms of methane emission during temperature changes in autumn from different surfaces: from the surface of water bodies and from the surface of the soil, and the article proposes methods for monitoring this mechanism and managing methane emissions during seasonal cooling. In addition, a comparative table of factors influencing methane emissions in water bodies and soil during surface freezing in autumn is presented. A conclusion is made about the possibility of reducing these factors to a common denominator and applying to all elements of the ecosystem. To develop the mechanisms of methane emissions, this paper examined relevant scientific and experimental studies of the last five to ten years, such as methane measurements in peatlands of China and Japan, on Lake Kortowskie (Poland), in Northern Alaska, in the tundra and in permafrost conditions. The results of this study are the patterns of methane emissions during soil and water freezing in the autumn period. It was revealed that the factors affecting methanogenesis for both soil and water bodies have a similar origin, which is due to the fact that they are located in the same ecosystem.

Keywords: methane, global warming, methane emission mechanism, surface freeze, temperature rise, geology, greenhouse effect, climate change, methane emissions, ground freeze

References (transliterated)

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Elektronnyi resurs. URL: <https://www.ipcc.ch/> (data obrashcheniya: 23.07.2024).
2. Synthesis Report AR6. Climate Change 2023 // Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Elektronnyi resurs. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/resources/spm-headline-statements> (data obrashcheniya: 23.07.2024).
3. Yang M. H., Ya T. D., Hirose N., Hideyuki F. Daily freeze-thaw cycle of the surface soil layer on the Qinghai-Tibet Plateau // Chinese Science Bulletin. 2006. № 51. S. 1974-1976.
4. Nikitina E. N. Izmenenie klimata v Arktike: adaptatsiya v otvet na novye vyzovy //

- Kontury global'nykh transformatsii: politika, ekonomika, pravo. 2019. № 5. S. 177-200. DOI: 10.23932/2542-0240-2019-12-5-177-200 EDN: OISKHG.
5. Vlad I. V., Sharovarov A. A. Voprosy predotvrashcheniya posledstviy global'nogo izmeneniya klimata v Arktike // Innovatsii i investitsii. 2023. № 1. EDN: LFVAWK.
 6. Paptsova I. I., Kamanin V. M. Vozdeistvie izmeneniya klimata na arkticheskie ekosistemy i otsenki emissii parnikovykh gazov pri ispol'zovanii morskikh sudov // Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. 2021. № S1. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-252-254 EDN: WDCWV.
 7. Sauer S., Hong W.-L., Yao H., Lepland A., Klug M., Eichinger F., Himmler T., Crémière A., Panieri G., Schubert C. J., Knies J. Methane transport and sources in an Arctic deep-water cold seep offshore NW Svalbard (Vestnesa Ridge, 79°N) // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2021. V. 167. P. 103430. DOI: 10.1016/j.dsr.2020.103430. EDN: PRCHSU.
 8. Bodanski D. Interventsii v oblasti izmeneniya klimata Arktiki // Mezhdunarodnyi zhurnal morskogo i pribreznogo prava. 2020. № 35(3). S. 596-617.
 9. Methane, explained. National Geographic. Elektronnyi resurs. URL: <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/methane/> (data obrashcheniya: 23.01.2025).
 10. Office of Air and Radiation, US EPA (October 7, 1999). U.S. Methane Emissions 1990-2020: Inventories, Projections, and Opportunities for Reductions (EPA 430-R-99-013). URL: <https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2013/07/EPA-Methane-Emissions-1990-2020.pdf> (data obrashcheniya: 04.02.2025).
 11. Rukovodstvo pol'zovatelya po otsenke vybrosov uglekislogo gaza, metana i zakisi azota v sel'skom khozyaistve s ispol'zovaniem instrumenta gosudarstvennogo kadastra (PDF). URL: https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-12/documents/ag_module_users_guide.pdf (data obrashcheniya: 11.02.2025).
 12. Buhaug H., von Uexkull N. Vicious Circles: Violence, Vulnerability, and Climate Change // Annual Review of Environment and Resources. 2021. № 46. DOI: 10.1146/annurev-environ-012220-014708. EDN: QDQOJM.
 13. Sorensen P. O., Finzi A. C., Giasson M.-A., Reinmann A. B., Sanders-DeMott R., Templer P. H. Winter soil freeze-thaw cycles lead to reductions in soil microbial biomass and activity not compensated for by soil warming // Soil Biology and Biochemistry. 2018. № 116. S. 39-47. DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.09.026.
 14. Mastepanov M., Sigsgaard C., Dlugokencky E., Houweling S., Ström L., Tamstorf M., Christensen T. R. Large tundra methane burst during onset of freezing // Nature. 2009. № 456. S. 628-630. DOI: 10.1038/nature07464. EDN: MLZBOB.
 15. Arndt K., Oechel W., Goodrich J., Bailey B., Kalhori A., Hashemi J., Sweeney C., Zona D. Increased methane emissions due to later soil freezing in Arctic tundra ecosystems. 2019.
 16. Li Ch., Brushkov A., Cheverev V., Sokolov A., Li K. Emissiya metana i uglekislogo gaza pri zamerzanii pochvy bez vechnoi merzloty // Energii. 2022. № 15. S. 2693. DOI: 10.3390/en15072693.
 17. Ragg R., Peeters F., Ingwersen J., Teiber-Sießegger P., Hofmann H. Interannual Variability of Methane Storage and Emission During Autumn Overturn in a Small Lake // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2021. № 126. DOI: 10.1029/2021JG006388. EDN: CEEHFB.
 18. Skveravski A. Sezonnaya i godovaya izmenchivost' vybrosov metana v atmosferu s poverkhnosti evtrofnogo ozera, raspolozhennogo v umerennoi zone (ozero Kortovskoe,

Pol'sha). 2024. DOI: 10.5194/egusphere-2024-1786.

19. Kuttim M., Hofsommer M. L., Robroek B. J. M., Signarbieux C., Jassey V. E. J., Laine A. M. Freeze-thaw cycles simultaneously reduce carbon uptake by peatland photosynthesis and ecosystem respiration // *Boreal Environ.* 2017. № 22. S. 267-276. EDN: YFSEUZ.
20. Tokida T., Mizoguchi M., Miyazaki T., Kagemoto A., Nagata O., Hatano R. Episodic methane ejection from peatlands during spring thaw // *Chemosphere.* 2007. № 70. S. 165-171. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.06.042. EDN: LZXYJR.
21. Mikhailov-Fletcher S., Tans P., Brachwiler L., Miller J., Neumann M. CH₄ sources estimated from atmospheric CH₄ observations and its C-13/C-12 isotope ratios: 1. Inverse modeling of source processes // *Global Biogeochemical Cycles.* 2004. Vol. 18. № 18.
22. Ofitsial'nyi sait Solidworks. Elektronnyi resurs. URL: <https://www.solidworks.com/> (data obrashcheniya: 11.02.2025).
23. Chernykh D., Salomatin A., Yusupov V., Shakhova N., Kosmach D., Dudarev O., Gershelis E., Silionov V., Anan'ev R., Semiletov I. Akusticheskie issledovaniya glubokovodnykh gazovykh faklov Okhotskogo morya // *Vestnik Tomskogo politekhnicheskogo universiteta "Inzhiniring geologicheskikh aktivov".* 2021. № 332. S. 57-68. DOI: 18799/24131830/2021/10/3286.
24. Leifer I., Chernykh D., Shakhova N., Semiletov I. Otsenka potoka gaza gidrolokatorom s pomoshch'yu puzyr'kovoi insonifikatsii: primeneniye k potoku puzyr'kov metana iz oblastei prosachivaniya vo vneshnem more Laptevnykh // *Kriosfera.* 2017. T. 11. № 3. S. 1333-1350.
25. Makarov M., Muyakshin S., Kucher K., Aslamov I., Granin N. Issledovanie gazovogo sipa Istok na Selenginskom melkovod'e aktivnymi akusticheskimi, passivnymi akusticheskimi i opticheskimi metodami // *Zhurnal issledovaniy Velikikh ozer.* 2020. T. 46. S. 95-101.
26. Veloso M., Greinert J., Mienert J., De Batist M. A new methodology for quantifying bubble flow rates in deep water using split-beam echosounders: Examples from the Arctic offshore NW-Svalbard // *Limnology and Oceanography-Methods.* 2015. V. 13. № 6. S. 267-287. DOI: 10.1002/lom3.10024. EDN: UONQKV.
27. Huang Y., Cui J., Zhima Z., Jiang D., Wang X., Wang L. Construction of a Fine Extraction Process for Seismic Methane Anomalies Based on Remote Sensing: The Case of the 6 February 2023, Türkiye-Syria Earthquake // *Remote Sensing.* 2024. № 16. S. 29-36. DOI: 10.3390/rs16162936. EDN: SBPIWR.
28. Eshkuvatov H., Ahmedov B., Shah M., Begmatova D., Jamjareegulgarn P., Melgarejo-Morales A. Exploring Electromagnetic Wave Propagation Through the Ionosphere Over Seismic Active Zones // *Pure Application Geophysics.* 2024. № 1-15.
29. Myrvoll-Nilsen E., Sørbye S. H., Fredriksen H. B., Rue H., Rypdal M. Statistical estimation of global surface temperature response to forcing under the assumption of temporal scaling // *Earth System Dynamics.* 2020. V. 11. № 2. S. 329-345. DOI: 10.5194/esd-11-329-2020. EDN: OAXWBE.
30. Von Uexkull N., Buhaug H. Security implications of climate change: A decade of scientific progress // *Journal of Peace Research.* 2021. № 58(1). S. 3-17. DOI: 10.1177/0022343320984210. EDN: ZVWXNW.
31. Yang Zao, Zhu Dan, Liu Liangfeng, Liu Xinwei, Chen Huai. The Effects of Freeze-Thaw Cycles on Methane Emissions From Peat Soils of a High-Altitude Peatland // *Frontiers in Earth Science.* 2022. № 10. DOI: 10.3389/feart.2022.850220. EDN: MUAYOF.

Gas emission funnels as an object of geocryology (Part 1)

Khimenkov Aleksandr Nikolaevich 

PhD in Geology and Mineralogy

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

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

✉ a_khimenkov@mail.ru

Stanilovskaya Julia Viktorovna 

Permafrost Infrastructure Interaction Specialist, Total

101000, Russia, Moscow, Ulanskii Pereulok Street 13

✉ e-mailyulia.stanilovskaya@total.com

Abstract. This publication is the first part of an article that demonstrates the significant role of the cryogenic factor in the preparation of pneumatic explosions within the body of permafrost rocks, based on an analysis of data available in scientific literature. The object of the study is local cryogenic gas-dynamic geosystems, the development of which leads to pneumatic explosions and the formation of gas blowout craters. The subject of the study is the morphology and structure of cryogenic formations in frozen rocks that make up the gas blowout craters found in the northern part of Western Siberia. The authors thoroughly examine aspects of the topic such as the analysis and generalization of data on the cryogenic structure of various elements in gas blowout craters. Special attention is given to the study of various deformations of primary ice formations, which allows tracking the history of the emergence and development of local gas-dynamic geosystems within permafrost rocks. The authors do not address questions related to the genesis of gas, as they believe that the pressure processes occurring in local gas-saturated zones with increased pressure do not depend on its origin. The main method used in this article is the analysis of materials from scientific publications on the subject, as well as laboratory modeling data conducted by the authors. The synthesis of the analyzed materials is based on a geosystemic approach. A significant contribution of the authors to the study of the topic is the identification of a common pattern in the structure of gas blowout craters. All craters that are not filled with water and are accessible for study exhibit a three-part structure. At the bottom of the craters, an expansion is observed, sometimes due to caverns and grottoes. In the middle part, the cross-section of the craters decreases, and the walls of the crater are most often steep and even. In the upper part, an expansion is observed in the shape of a flare. The novelty of the research lies in uncovering the paragenetic relationships between the morphological structure of the craters, the stages of development of the gas-dynamic geosystem that prepares conditions for pneumatic explosions, and the complexes of processes at each stage. The main conclusions of the research include the identification of the leading role of gas pressure in the transformation of the cryogenic structure of frozen rocks at all stages.

Keywords: stage of development, paragenetic relations, ice-soil gas-saturated geosystems, fluid geodynamics, gas fluids, gas filtration, shear deformations, rupture deformations, plastic deformations, permafrost

References (transliterated)

1. Bogoyavlenskii V. I. Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki.

- Voronki Yamala i Taimyra. Chast' 2 // Burenie i neft'. 2014. № 10. S. 4-8. EDN: SXDCEJ.
2. Bogoyavlenskii V. I. Gazogidrodinamika v kraterakh vybroso gaza // Arktika: ekologiya i ekonomika. 2018. № 1 (29). S. 48-54. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55. EDN: YWKVVU.
 3. Leibman M. O., Kizyakov A. I. Novyi prirodnyi fenomen v zone vечноi merzloty // Priroda. 2016. № 2. S. 15-24.
 4. Epov M. I. i dr. Bermudskii treugol'nik Yamala // Nauka iz pervykh ruk. 2014. Vyp. 5 (59). S. 14-23. EDN: SYRRRB.
 5. Khilimonyuk V. Z. i dr. Geo-kriologicheskie usloviya territorii raspolozheniya Yamal'skogo kratera // V konferentsiya geokriologov Rossii. M.: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2016. T. 2. S. 245-255.
 6. Buldovich S. N. i dr. Cryogenic hypothesis of the Yamal crater origin. Results of detailed studies and modeling. 5th European Conference on Permafrost - Book of Abstracts. 23 June - 1 July 2018. Chamonix, France. R. 97-98.
 7. Buldovich S. N. i dr. 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. EDN: VBFJYO.
 8. Khimenkov A. N. i dr. Gazovye vybrosoy v kriolitozone, kak novyi vid geokriologicheskikh opasnostei // Georisk. 2017. № 3. S. 58-65. EDN: ZQJKVX.
 9. Khimenkov A. N. i dr. Geosistemy gazonasyschennnykh mnogoletnemerzlykh porod, otv. red. Yu. D. Zykov. M.: Geoinfo, 2021. EDN: BCAKQS.
 10. Chuvilin E. M. i dr. Formation of Gas-Emission Craters in Northern West Siberia: Shallow Controls // Geosciences. 2021. 11 (9). 393. DOI: 10.3390/geosciences11090393. EDN: HLJDJE.
 11. Romanovskii N. N. Osnovy kriogeneza litosfery. M.: Izd-vo MGU, 1993. 336 s.
 12. Khimenkov A. N., Koshurnikov A. V. Lokal'nye kriogennye geosistemy. Sbornik dokladov Shestoi konferentsii geokriologov Rossii "Monitoring v kriolitozone" s uchastiem rossiiskikh i zarubezhnykh uchenykh, inzhenerov i spetsialistov. M.: "KDU", "Dobrosvet", 2022. S. 502-509. DOI: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130. EDN: ADUSBK.
 13. Khimenkov A.N., Stanilovskaya Yu.V. Fenomenologicheskaya model' formirovaniya voronok gazovogo vybroso na primere Yamal'skogo kratera. // Arktika i Antarktika. 2018. № 3. S. 1-25. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27524 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=27524
 14. Kizyakov A. I. i dr. Geomorfologicheskie usloviya obrazovaniya voronki gazovogo vybroso i dinamika etoi formy na tsentral'nom Yamale // Kriosfera Zemli. 2015. T. XIX. № 2. S. 15-25. EDN: TWMXKN.
 15. Bogoyavlensky V. i dr. New Catastrophic Gas Blowout and Giant Crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the Expedition and Data Processing // Geosciences. 2021. 11, 71. DOI: 10.3390/geosciences11020071. EDN: XWPMBU.
 16. Khimenkov A.N., Koshurnikov A.V., Karpenko F.S., Kutergin V.N., Gagarin V.E., Sobolev P.A. O fil'tratsii gazov v mnogoletnemerzlykh porodakh v svete problemy degazatsii litosfery Zemli i formirovaniya estestvennykh vzryvnykh protsessov v kriolitozone // Arktika i Antarktika. 2019. № 3. S. 16-38. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.3.29627 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=29627
 17. Khimenkov A. N., Koshurnikov A. V., Sobolev P. A. Fil'tratsiya gaza v merzlykh gruntakh // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya. 2020. № 3. S. 97-

103. DOI: 10.33623/0579-9406-2020-3-97-103. EDN: RZPOTC.
18. Chuvilin E. M. i dr. Eksperimental'noe modelirovanie fil'tratsii gaza v merzlykh i gidratosoderzhashchikh porodakh v usloviyakh odnoosnogo szhatiya // Kriosfera Zemli. 2024. T. XXVIII. № 6. S. 31-44. DOI: 10.15372/KZ20240603. EDN: GRTHXO.
19. Bogoyavlenskii V. I. i dr. Vybrosy gaza iz kriolitozony poluostrova Yamal. Predvaritel'nye rezul'taty ekspeditsii 8 iyulya 2015 g. // Burenie i neft'. 2015. № 7-8. S. 8-13. EDN: UFEMVH.
20. Bogoyavlenskii V. I. i dr. Monitoring razvitiya Dupletnogo ob'ekta vzryva gaza S22 na poluostrove Yamal po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli // Arktika: ekologiya i ekonomika. 2024. T. 14. № 3. S. 320-333. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-320-333. EDN: FCBZYH.
21. Galeeva E. I. i dr. Sravnitel'nyi analiz stroeniya poligonal'no-zhil'nykh i plastovykh l'dov // Materialy pyatoi konferentsii geokriologov Rossii. MGU imeni M. V. Lomonosova, 14-17 iyunya 2016 g. T. 2. Chast' 5. Regional'naya i istoricheskaya geokriologiya. Moskva: Universitetskaya kniga, 2016. S. 291-297. EDN: YOLUOB.
22. Blog "Mir vokrug: raznoe", 2017. Na Yamale obnaruzhili novuyu voronku v zemle. Data obrashcheniya: 15.04.2021. URL: http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blogpost_9.html. Ofitsial'nyi sait RT, 2015. Taina Yamal'skogo kratera: korrespondent RT popytalsya razgadat' zagadku sibirskikh voronok. Data obrashcheniya: 15.04.2021. URL: <https://russian.rt.com/article/105424>.
23. Vasily Bogoyavlensky i dr. New Catastrophic Gas Blowout and Giant Crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the Expedition and Data Processing // Geosciences. 2021. 11, 71. DOI: 10.3390/geosciences11020071.
24. Ofitsial'nyi sait RT, 2015. Data obrashcheniya: 15.04.2021. URL: <https://russian.rt.com>.
25. Bogoyavlenskii V. I. i dr. Degazatsiya Zemli v Arktike: distantsionnye i ekspeditsionnye issledovaniya katastroficheskogo Seyakhinskogo vybrosa gaza na poluostrove Yamal // Arktika: ekologiya i ekonomika. 2019. № 1 (33). S. 88-105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105. EDN: TUHSJS.
26. Supplementary Materials for Cryovolcanism on the Earth: the Origin of the Spectacular Crater on Yamal Peninsula (Russia) S. N. Buldovicz i dr. // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. DOI: 10.1038/s41598-018-31858-9.
27. Moss J. L., Cartwright J. 3D seismic expression of km/scale fluid escape pipes from offshore Namibia // Basin Research. 2010. Vol. 22. № 4. P. 481-501. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2010.00461.x. EDN: MYVQHJ.
28. Cartwright J., Santamarina C. Seismic characteristics of fluid escape pipes in sedimentary basins: Implications for pipe genesis // Marine and Petroleum Geology. 2015. Vol. 65. P. 126-140. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2015.03.023. EDN: UVHWDL.
29. Rybak E. N., Stupina L. V. Pokmarki Chernogo morya // Geologiya i korisni kopalini Svitovogo okeanu. 2019. 15. № 2. S. 16-34. DOI: 10.15407/gpimo2019.01.016. EDN: VDDNQT.
30. Shchelokova D. V. Netraditsionnye uglevodorody kak istochnik neischerpaemosti toplivno-energeticheskikh resursov // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov. 2016. № 1. S. 120-126. EDN: VZYTJV.
31. Buzanov K. V. Issledovanie i sovershenstvovanie tekhnologii bezavariinogo bureniya intervalov pod napravleniya i konduktory razvedochnykh i ekspluatatsionnykh skvazhin na mestorozhdeniyakh Vostochno-Sibirskogo regiona: na primere Kuyumbinskogo neftyanogo mestorozhdeniya: avtoreferat dis. kandidata tekhnicheskikh nauk. Tomsk:

- Nats. issled. Tom. politekhn. un-t, 2018. 22 s. EDN: UFNVDS.
32. Shiyun Lei, Xiujun Guo, Haoru Tang. Experiment and analysis of the formation, expansion and dissipation of gas bag in fine sediments based on pore water pressure survey // *Acta Oceanol. Sin.* 2022. Vol. 41, No. 4. P. 91-100. DOI: 10.1007/s13131-021-1851-x. EDN: RXUXAS.
 33. Khimenkov A.N., Koshurnikov A.V., Dernova E.O. Gazonasyschennyye merzlye porody, kak ob'ekt izucheniya geokriologii // *Arktika i Antarktika*. 2023. № 1. S. 26-64. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.1.40378 EDN: PLNGUD URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=40378
 34. Are F. E. Problema emissii glubinnykh gazov v atmosferu // *Kriosfera Zemli*. 1998. T. II. № 4. S. 42-50.
 35. Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdenii poluostrova Yamal. T. 2: Kriosfera Bovanenkovskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya. M.: OOO "Gazprom Ekspo", 2013. 424 s.
 36. Lenchenko N. N. Dinamika podzemnykh vod. M.: MGGU, 2004. 65 s.
 37. Bull J. M. i dr. Constraining the physical properties of chimney/pipe structures within sedimentary basins. 14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-14. 21st -25th October 2018. Melbourne, Australia. 2018.
 38. Khimenkov A. N. i dr. Vzryvnye protsessy v oblasti rasprostraneniya mnogoletnemerzlykh porod - novyi vid geokriologicheskoi opasnosti // *Geoekologiya*. 2019. № 6. S. 30-41. DOI: 10.31857/S0869-78092019630-41. EDN: JRXQRV.
 39. Bobin V. A. Kontseptual'naya model' geomekhanicheskikh i vzryvnykh protsessov pri formirovanii i razvitii "Yamal'skogo kratera" // *Inzhenernaya fizika*. 2021. № 5. S. 47-56. DOI: 10.25791/infizik.5.2021.1209. EDN: LCRNAB.
 40. Tsytoich N. A. Mekhanika merzlykh porod. M.: Vysshaya shkola, 1973. 448 s.
 41. Vyalov S. S. Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov. M.: Vysshaya shkola, 1978. 447 s.
 42. Mikrostroenie merzlykh porod / pod red. E. D. Ershova. M.: Izd-vo MGU, 1988. 183 s.
 43. Osnovy geokriologii. Ch. 1: Fiziko-khimicheskie osnovy geokriologii / pod red. E. D. Ershova. M.: Izd-vo MGU, 1995. 368 s.
 44. Strikha V. E. Metodicheskoe posobie po distsipline "Strukturnaya geologiya", kratkii kurs lektsii: uchebnoe posobie. Blagoveshchensk: Amurskii gos. un-t, 2012.
 45. Gzovskii M. V. Osnovy tektonofiziki. M.: Nauka, 1975. 536 s.
 46. Patalakha E. I. Novaya kontseptsiya dislokatsionnogo protsessa // V kn.: *Ekspertimental'naya tektonika v teoreticheskoi i prikladnoi geologii*. M.: Nauka, 1985. S. 37-50.
 47. Solomatin V. I. Fizika i geografiya podzemnogo oledeneniya. Novosibirsk: Akad. izd-vo "Geo", 2013. EDN: VNJSXZ.
 48. Krukovskaya V. V. K raschetu fil'tratsii gaza v treshchinovato-poristoi neodnorodnoi srede // *Geotekhnicheskaya mekhanika: Mezhd. sb. nauch. tr. Dnepropetrovsk: IGTM NANU*, 2004. Vyp. 51. S. 257-265.
 49. Tur V. V., Molosh V. V. K opredeleniyu soprotivleniya srezu pri proverkah na prodavlivanie ploskikh plit monolitnykh perekrytii // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. № 1. S. 21-32.
 50. Ahmad Mahmoud Abdullah. Analysis of Repaired/Strengthened R.C. Structures Using Composite Materials: Punching Shear. A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and

Physical Sciences. 2010. 272 p.

51. Svidunovich N. A., Okatova G. P., Kuis D. V. Materialovedenie i tekhnologiya konstruksionnykh materialov: laboratornyi praktikum s ispol'zovaniem metallograficheskogo kompleksa. Minsk: BGTU, 2011.
52. Gumerov A. G., Gumerov R. S., Gumerov K. M. Bezopasnost' dlitel'no ekspluatiruemykh magistral'nykh nefteprovodov. M.: Nedra-Biznestsentr, 2003.
53. Tsvetkov B. M., Sizov I. A., Syrnikov N. M. O mekhanizme drobleniya tverdoi sredy vzryvom // Doklady AN SSSR. 1976. T. 231. № 5. S. 1067-1069.
54. Vol'fson F. I., Yakovlev P. D. Struktury rudnykh polei i mestorozhdenii. Nedra, Moskva, 1975.
55. Gornaya entsiklopediya. T. 5. Sovetskaya entsiklopediya, Moskva, 1991.
56. Alidibirov M. A. Mekhanizm fragmentatsii sil'novyazkoi magmy pri vulkanicheskikh vzryvakh (eksperimental'noe issledovanie): avtoref. dis. ... d. f.-m. n. M., 1998. 44 s. EDN: ZKFVYJ.
57. Kedrinskii V. K. Gidrodinamika vzryva: eksperiment i modeli. Novosibirsk: Izdvo SO RAN, 2000.
58. Panov V. K. Primenenie lineinoi teorii nestatsionarnoi fil'tratsii dlya analiza eksperimentov po razrusheniyu poristogo gazonasyschennogo materiala // Vestnik kraunts. nauki o Zemle. 2009. № 1. Vyp. № 13. S. 89-97. EDN: KTZSYN.
59. Panov V. K. Eksperimental'noe modelirovanie protsessov pri izverzhenii tipa "napravlennyy vzryv" // Problemy eksplozivnogo vulkanizma. Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma. Petropavlovsk-Kamchatskii, 25-30 marta. Petropavlovsk-Kmchatskii: IViS DVO RAN, 2006. S. 49-57.
60. Leibman M. O., Plekhanov A. V. Yamal'skaya voronka gazovogo vybrosa // Kholod'OK. 2014. № 2 (12). S. 9-15.
61. Bogoyavlensky V. I. i dr. Complex of Geophysical Studies of the Seyakha Catastrophic Gas Blowout Crater on the Yamal Peninsula, Russian Arctic. Geosciences. 2020. 10, 215. [Google Scholar] [CrossRef].
62. Bogoyavlenskii V. I. i dr. Degazatsiya Zemli v Arktike: distantsionnye i ekspeditsionnye issledovaniya katastroficheskogo Seyakhinskogo vybrosa gaza na poluostrove Yamal // Arktika: ekologiya i ekonomika. 2019. № 1 (33). S. 88-105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105. EDN: TUHSJS.

Forecast estimates of hydrocarbon potential areas of Antarctica based on geophysical data measured within the concentric geological-morphological features of the Earth's crust and glacial cover

Kharitonov Andrey Leonidovich 

PhD in Physics and Mathematics

Senior Researcher; Laboratory of the Main Magnetic Field of the Earth; Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences

7, 3rd Novovatutinskaya Street, 56 block, Desenovskoye, Moscow, 108818

✉ Haritonov-magnit@yandex.ru

Abstract. The subject of this article is the concentric geological-morphological features identified in Antarctica in the glacial cover, the seismotectonic structure of the earth's crust, the values of heat flow, and the number of lakes. Previously, the interrelationships of the

geographical location of concentric geologic-morphological features and the degassing of methane effluents from the subglacial layers of the earth's crust in the Arctic were revealed. The article examines the concentric features identified by the results of digitized relief maps of various deep surfaces (the surface of glaciers, the "over-cover", the "sole-cover" of the earth's crust), the values of heat flow, the number of lakes in Antarctica based on satellite, ground-based geophysical data used to prospecting of hydrocarbon deposits. The scope of the results is related to probabilistic forecasting of regions that are promising for prospecting and exploration of new hydrocarbon deposits in Antarctica. At the same time, reference statistical data were used on the densities of the distribution of thickness crust and heat flow corresponding to the Gaussian distribution characteristic of the concentric features of the Russian oil and gas basins. It is shown for the first time that the spatial arrangement of the number of subglacial lakes within certain areas of concentric geological-morphological features in Antarctica can be approximated in accordance with the distribution described by Poisson's law. The research methods are based on the principles of probability theory and statistics. Histograms and distribution densities are constructed, the average risk (Bayes criterion) is determined, the decision threshold for heat flow values, and the areas of concentric features normalized to the number of subglacial lakes in them, measured within the location of 48 concentric features. The scientific novelty of the conducted research lies in the fact that for the first time the coordinates of the geographical location, spatial dimensions (diameters of 200-1000 kilometers) were determined and estimates of the probabilities were made to predict the hydrocarbon potential of 48 concentric geological-morphological features identified on the surface of the glacial cover and the upper and lower layers of the earth's crust in Antarctica. The main conclusions of the study are the revealed interrelations of hydrocarbon-perspective concentric geological-morphological features of the seismotectonic structure of the earth's crust (Moho), values of heat flow and density of distribution of subglacial lakes in Antarctica. The practical novelty of the study lies in the fact that, for the first time, mathematical forecasting of the presence of hydrocarbon-promising concentric geological-morphological features on the territory of East and West Antarctica has been performed.

Keywords: the thickness of the Earth's crust, structures of the glacial cover, heat flow, satellite data, methods of probability theory, forecast of hydrocarbon-promising regions, number of subglacial lakes, concentric geological-morphological features, mantle plumes, Antarctica

References (transliterated)

1. Atlas kosmicheskikh snimkov "Zemlya iz kosmosa". Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii SSSR. Gosudarstvennyi nauchno-issledovatel'skii i proizvodstvennyi tsentr "Priroda". 1985. 300 s.
2. Bogoyavlenskii I.V., Bogoyavlenskii V.I. Degazatsiya Zemli. Formirovanie zalezhei uglevodoroda v verkhnei chasti razreza i kraterov vybrosov gaza // Delovoi zhurnal "Neftegaz.Ru". 2021. № 1. S. 48-55.
3. Bott M. Vnutrennee stroenie Zemli. M.: Mir, 1974. 373 s.
4. Vasil'chuk Yu.K., Belik A.D., Budantseya N.A., Gennadiev A.N., Vasil'chuk A.K., Vasil'chuk Dzh.Yu., Zavgorodnyaya Yu.A., Ginzburg A.P., Bludushkina A.B. Politsiklicheskie aromaticheskie uglevodorody i izotopy ugleroda v torfe migratsionnogo bugra pucheniya (Bol'shezemel'skaya tundra) // Pochvovedenie. 2021. № 7. S. 797-805. DOI: 10.31857/S0032180X21070133 EDN: MZJTLF.
5. Demenitskaya R.M. Kora i mantiya Zemli. M.: Nedra, 1975. 253 s.
6. Kats Ya.G., Poletaev A.I., Sulidi-Kondrat'ev E.D. Kol'tsevye struktury lika planety. M.:

Znanie, 1989. 48 s.

7. Kogan A.A. Glubinnoe seismicheskoe zondirovanie zemnoi kory v Vostochnoi Antarktide // Sb. "Antarktika", vyp. 13. M.: Nauka, 1974. S. 85-104.
8. Koryakin E.D. Stroenie zemnoi kory morya i dugi Skosha po geofizicheskim dannym // Sb. "Antarktika", vyp. 12. M.: Nauka, 1973. S. 30-57.
9. Kuzyakin L.P., Belova N.G., Vasil'chuk Yu.K. i dr. Metan v plastovykh l'dakh Vostochnoi Kamchatki, kak indikator ikh genezisa // Led i sneg. 2024. T. 64. № 3. S. 447-463. DOI: 10.31857/S2076673424030106 EDN: INGZDK.
10. Ravich M.G., Kamenev E.N. Kristallicheskie fundamenty Antarkticheskoi platformy. L.: Gidrometeoizdat, 1972. 150 s.
11. Stroeve P.A. Moshchnost' i nekotorye cherty stroeniya zemnoi kory v Yuzhnom okeane i v pribrezhnoi zone Antarktidy // Sb. "Antarktika", vyp. 12. M.: Nauka, 1973. S. 42-59.
12. Syvorotkin V.L. Glubinnaya degazatsiya Zemli i global'nye katastrofy. M.: Geoinformtsentr, 2002. 250 s.
13. Tektonicheskaya karta Antarktidy. Masshtab 1:40 000 000. Pod red. Ravich M.G., Grikurov G.E. L.: NIIGA, 1976. 1 l.
14. Timurziev A.I. Mif "energeticheskogo goloda" ot Khabberta i puti vosproizvodstva resursnoi bazy Rossii na osnove realizatsii proekta "Glubinnaya neft'" // Burenie i neft'. 2019. № 1. S. 12-20. EDN: YZHFNJ.
15. Frolov A.I., Stroeve P.A., Koryakin E.D. Gravitatsionnoe pole i stroenie zemnoi kory zemli Uilksa i zemli Viktorii (Vostochnaya Antarktida) // Sb. "Morskie gravimetricheskie issledovaniya", vyp. 6. M.: MGU, 1970. S. 104-113.
16. Kharitonov A.L. Prognozirovaniye uglevodorodoperspektivnykh struktur kol'tsevogo vida v Barentsevomorskom regione po rezul'tatam primeneniya stokhasticheskogo metoda pri ispol'zovanii sovokupnosti geoparametrov // Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Nauki o Zemle. 2024. T. 24. № 2. S. 130-137. DOI: 10.18500/1819-7663-2024-24-2-130-138 EDN: ORAMII.
17. Kharitonov A.L., Kharitonova G.P., Truong K.Kh. Sopostavleniye sputnikovyykh geomagnitnykh dannykh s nazemnym izmereniem kontsentratsii radona dlya vyavleniya predvestnikov zemletryaseniya (na primere Kaliforniiskogo seismoaktivnogo raiona) // Vestnik Kamchatskoi regional'noi organizatsii Uchebno-nauchnyi tsentr. Seriya: Nauki o Zemle. 2009. № 13. S. 170-177. EDN: KTZTBF.
18. Bendat J.S., Pierol A.G. Random data: analysis and measurement procedures. New York: Wiley-Interscience, 1972. 464 p.
19. Bentley C.R. Crustal structure of Antarctic // Tectonophysics. 1973. Vol. 20. N 1-4. P. 229-240.
20. Ebbing J. i dr. Earth tectonics as seen by GOCE - enhanced satellite gravity gradient imaging // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. N 1. P. DOI: 10.1038/s41598-018-34733-9 EDN: AWYWZM.
21. Henricson S.W. National Geodetic Satellite Program. NASA, 1977.
22. IHFC. Global Heat Flow Database of the International Heat Flow Commission, 2012.
23. Langel R.A. i dr. MAGSAT data processing: a report for investigators // Technical memorandum 82160: NASA, 1981. 329 p.
24. LANDSAT.usgp.gov/documents/DFCB_Vol_IV.L.pdf. Ebook LANDSAT 7 SYSTEM.
25. Li L., Aitken A.R.A. Crustal heterogeneity of Antarctica signals spatially variable radiogenic heat production // Geophysical Research Letters. 2024. Vol. 51. N 2. DOI: 10.1029/2023GL106201 EDN: EFIPQI.

26. Lloyd A.J. i dr. Seismic structure of the Antarctic upper mantle imaged with adjoint tomography // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2020. Vol. 125. N 3. DOI: 10.1029/2019JB017823 EDN: UZPPQH.
27. Reading A.M. i dr. Antarctic geothermal heat flow and its implications for tectonics and ice sheets // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Vol. 3. N 12. P. 814-831. DOI: 10.1038/s43017-022-00348-y EDN: PSPYLZ.
28. Risk G.F., Hochstein M.P. Heat flow at arrival heights, Ross Island, Antarctica, New Zealand // Journal of Glaciology. 1974. Vol. 46. N 155. P. 665-674. <https://doi.org/10.3189/172756500781832701>.
29. Seroussi H. i dr. InitMIP-Antarctica: an ice sheet model initialization experiment of ISMIP6 // The cryosphere. 2019. N 13. P. 1441-1471. DOI: 10.5194/tc-13-1441-2019 EDN: XNQGDK.
30. Shen W. i dr. A geothermal heat flux map of Antarctica empirically constrained by seismic structure // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47. N 14. DOI: 10.1029/2020GL086955 EDN: LOUZMC.
31. Steinberger B., Steinberger A. Mantle plumes and their interactions // Dynamics of Plate Tectonics and mantle convection. 2023. P. 407-426. DOI: 10.1016/B978-0-323-85733-8.00021-4.

Errors in linearizing the dependence of the thermal conductivity coefficient of snow on density

Galkin Aleksandr Fyodorovich 

Doctor of Technical Science

Chief Researcher; P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS

677010, Russia, Yakutsk, Permafrost str., 36, IMZ SB RAS. Cryolithozone Geothermy Laboratory

✉ afgalkin@yandex.ru

Zhirkov Aleksandr Fedotovitch

PhD in Technical Science

Senior Researcher; Cryolithozone Geothermy Laboratory; P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS

677010, Russia, Rep. Sakha (Yakutia), Yakutsk, Permafrost str., 36

✉ zhirkov_af@mail.ru



Pankov Vladimir Yur'evich

PhD in Geology and Mineralogy

Associate Professor; Department of Road and Airfield Construction; Northeastern Federal University

677027, Russia, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, ul. Belinsky, 58

✉ pankov1956@gmail.ru



Abstract. The subject of the research is the functional dependence of the thermal conductivity coefficient of snow on its density. The object of the research was the linearization of the function expressed by a polynomial of arbitrary degree, characteristic of the quantitative dependence of the thermal conductivity coefficient on the density of snow. Special attention is paid to the analysis of errors arising from replacing a polynomial function with a linear one. Particular attention is also given to the analysis of existing functional dependencies of the thermal conductivity coefficient on snow density, which is an integral

indicator of complex heat and mass transfer processes occurring during the metamorphism of the snow cover. The main formulas for predicting the thermal conductivity coefficient based on snow density have been analyzed. All dependencies are conditionally divided into two groups: linear and nonlinear (expressed by polynomials of the second, third, and fourth degrees). To find the point corresponding to the maximum value of the linearization error of the second group of methods, an appropriate target function has been constructed and studied in its most general form. When constructing the function defining the absolute error that arises from linearization, a generalized polynomial of derivative degree, which describes known experimental and theoretical dependencies of the thermal conductivity coefficient of snow on its density, was taken as the original formulas. The resulting function was analyzed for its maximum using the classical method of differentiating the original dependence with respect to the argument. The scientific novelty lies in the fact that for the first time a dependence has been obtained between the error arising from the linear and nonlinear representations of the experimental approximating dependencies of the thermal conductivity coefficient of snow and its density. It has been shown that when linearizing a quadratic dependence (Abel's, Kondratyeva's, Brecht's, Sturm's formulas, etc.), the maximum absolute error is found in the middle of the averaging interval. At this point, its value equals the value of the original function. As the degree of the polynomial increases, the maximum error shifts toward the upper boundary of the linearization interval and changes, for example, for the cubic polynomial (Van Dussen's formula) to a value equal to 0.58 of the linearization range. For the fourth-degree polynomial (Jansen's formula), it reaches 0.63 of the range. When the degree is reduced to less than two (Yen's, Schwander's formula), on the contrary, the maximum linearization error shifts from the middle of the interval to the lower boundary.

Keywords: accuracy of determination, error, linearization, forecast, formula, coefficient, thermal conductivity, density, properties, snow

References (transliterated)

1. Rikhter G.D. Rol' snezhnogo pokrova v fiziko-geograficheskom protsesse. M.-L.: Izd-vo AN SSSR, 1948. 171 s.
2. Park H., Fedorov A.N., Zheleznyak M.N., Konstantinov P.N., Walsh J.E. Effect of snow cover on pan-Arctic permafrost thermal regimes // *Climate Dynamics*. 2015. Vol. 44. P. 2873-2895. doi: 10.1007/s00382-014-2356-5.
3. Fedorov A.N., Novopriyehzhaya V.A., Fedorov N.A., Konstantinov P.Y., Samsonova V.V. Retrospective Analysis of Permafrost Landscape Evolution in Yakutia during the Holocene Warm Intervals // *Land*. 2020. Vol. 9. P. 463. doi:10.3390/land9110463.
4. Kuz'min P.P. Protseess tayaniya snezhnogo pokrova. L.: Gidrometeoizdat, 1961. 346 s.
5. Shul'gin A.M. Snezhnaya melioratsiya i klimat pochvy. L.: Gidrometeoizdat, 1986. 70 s.
6. Shul'gin A.M. Snezhnyi pokrov i ego ispol'zovanie v sel'skom khozyaistve. L.: Gidrometeoizdat, 1962. 84 s.
7. Kruchinin I.N. Formirovanie snezhnogo nakata s zadannymi svoystvami na lesovoznykh avtomobil'nykh dorogakh // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*. 2012. № 1 (325). S. 38-41.
8. Anikin A.A., Barakhtanov L.V., Donato I.O. Fiziko-mekhanicheskie svoystva snega kak polotna puti dlya dvizheniya mashin // *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N. E. Bauman: Elektronnyi zhurnal*. 2010. № 10. S. 1-8.
9. Morozov V.S. Raschet odnosloinykh zimnikh avtomobil'nykh dorog na prochnost' // *Innovatsionnaya nauka*. 2015. № 11-2. S. 84-88.

10. Fierz C., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Green E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground (IHP-VII Technical Documents in Hydrology № 83; IACS Contribution № 1). Paris: UNESCO-IHP, 2009. 80 p.
11. Yen Y.-C. Review of the thermal properties of snow, ice and sea ice. Tech. Rep. No. 81-10. Hanover, NH: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1981.
12. Calonne N., Flin F., Morin S., Lesaffre B., du Roscoat S.R., Geindreau C. Numerical and experimental investigations of the effective thermal conductivity of snow // Geophysical Research Letters. 2011. Vol. 38. L23501. doi:10.1029/2011GL049234.
13. Fukusako S. Thermophysical properties of ice, snow, and sea ice // International Journal of Thermophysics. 1990. Vol. 11. No. 2. P. 353-372. doi:10.1007/bf01133567.
14. Kirillin A.R., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F., Misailov I.E., Verkhoturov A.G., Sivtsev M.A. Osobennosti snegonakopleniya i parametry snezhnogo pokrova na El'konskom gornom massive // Vestnik Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta. 2020. T. 26. № 7. S. 62-76. doi:10.21209/2227-9245-2020-26-7-62-76.
15. Osokin N.I., Sosnovskii A.V. Eksperimental'nye issledovaniya koeffitsienta effektivnoi teploprovodnosti snezhnogo pokrova na Zapadnom Shpitsbergene // Led i sneg. 2014. T. 54. № 3. S. 50-58.
16. Osokin N.I., Sosnovskii A.V. Prostranstvennaya i vremennaya izmenchivost' tolshchiny i plotnosti snezhnogo pokrova na territorii Rossii // Led i sneg. 2014. № 4 (54). S. 72-80. doi:10.15356/2076-6734-2014-4-72-80.
17. Abels G. Daily variation of temperature in snow and the relation between the thermal conductivity of snow and its density // Meteorol. Vestnik. 1893. Vol. 3.
18. Calonne N., Milliancourt L., Burr A., Philip A., Martin C.L., Flin F., Geindreau C. Thermal conductivity of snow, firn, and porous ice from 3-D image-based computations // Geophysical Research Letters. 2019. Vol. 46. P. 13,079-13,089. doi:10.1029/2019GL085228.
19. Pozdnyakov S.P., Grinevskii S.O., Dedyulina E.A., Koreko E.S. Chuvstvitel'nost' rezul'tatov modelirovaniya sezonnogo promerzaniya k vyboru parametrizatsii teploprovodnosti snezhnogo pokrova // Led i sneg. 2019. T. 59. № 1. S. 67-80. doi:10.15356/2076-6734-2019-1-67-80.
20. Sturm M., Holmgren J., König M., Morris K. The thermal conductivity of seasonal snow // Journal of Glaciology. 1997. Vol. 43. No. 143. P. 26-41.
21. Sulakvelidze G.K. Thermo-conductivity equation for vapor diffusivity of naturally compacted snow // Bulletin of the Academy of Sciences USSR, Geophysical Series. 1959. P. 186-188.
22. Pavlov A.V. Monitoring kriolitozony. Novosibirsk: "Geo", 2008. 229 s.
23. Galkin A.F., Plotnikov N.A. Raschet koeffitsienta teploprovodnosti snezhnogo pokrova // Arktika i Antarktika. 2023. № 3. S. 16-23. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.3.43733 EDN: VMDOVA URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=43733
24. Yen Y.-C. Effective thermal conductivity and water vapor diffusivity of naturally compacted snow // Journal of Geophysical Research. 1965. Vol. 70. P. 1821-1825.
25. Chernov P.A. Eksperimental'noe opredelenie teploprovodnosti glubinnoi izmorozi // Led i sneg. 2013. № 3 (123). S. 71-77.
26. Borisov V.A., Akinin D.V., Gasilina M.A., Romanova A.R. Teploprovodnost' snezhnogo pokrova i fizicheskie protsessy, proiskhodyashchie v nem pod vliyaniem temperaturnogo gradienta // Resources and Technology. 2023. T. 20. № 4. S. 45-73. doi:10.15393/j2.art.2023.7243.

27. Verkin B.I., Yanson I.K., Sukhodub L.F., Teplitskii A.B. Vzaimodeistviya biomolekul: novye eksperimental'nye podkhody i metody. Kiev: Naukova Dumka, 1985. 163 s.