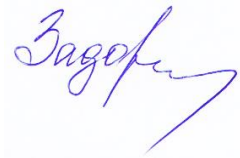


На правах рукописи



Задорожная Наталья Александровна

**МЕТАН В МЕРЗЛЫХ И ПРОТАИВАЮЩИХ ПОРОДАХ ЗАПАДНОЙ
АРКТИКИ**

Специальность: 1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Тюмень – 2024

Работа выполнена в Институте криосферы Земли – обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (ИКЗ ТюмНЦ СО РАН)

Научный руководитель: *Васильев Александр Алексеевич*, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник ИКЗ ТюмНЦ СО РАН

Официальные оппоненты:

Брушков Анатолий Викторович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геоэкологии геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Чувилин Евгений Михайлович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Сколковского института науки и технологий

Ведущая организация: Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук (ИФХИБПП РАН) Федерального исследовательского центра «Пущинский научный центр биологических исследований Российской академии наук» (ФИЦ ПНЦБИ РАН)

Защита состоится 11 апреля 2024 г. в 14³⁰ ч. на заседании диссертационного совета 24.2.364.01 при Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе (МГРИ) по адресу: 117997, Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, ауд. 4-73.

E-mail: DIS.212.121.01@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке МГРИ и на сайте Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, <http://mgri.ru/>

Автореферат разослан «__» февраля 2024 г.

Учёный секретарь диссертационного совета 24.2.364.01 к.г.-м.н., доцент



Горобцов Д.Н

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последнее десятилетие проблема эмиссии метана в атмосферу при деградации многолетнемерзлых пород (ММП) в Арктике, в том числе на шельфе арктических морей, стала одной из приоритетных, многие исследователи активно занимаются оценками её влияния на климатические изменения. Метан (CH_4) обладает мощным парниковым эффектом, поэтому его выбросы могут значительно ускорить потепление климата (IPCC, 2018 и многие другие). Существует и другая точка зрения, предполагающая не столь существенное влияние деградации мерзлоты на потепление климата (Anisimov, 2007). Содержание метана в мерзлых и протаивающих четвертичных отложениях и подземных льдах, вмещающих большие запасы парниковых газов, изучено недостаточно. Получены данные по газопроявлениям при бурении инженерно-геокриологических скважин (Якушев и др., 2003 и другие). Особую актуальность исследования метана в многолетнемерзлых и протаивающих породах приобрели после обнаружения воронок газовых выбросов на Ямале. Оценено влияние геокриологических условий и метана на образование воронок (Богоявленский и др., 2017; Leibman et al., 2014; Chuvilin et al., 2020). По восточной Арктике имеются оценки содержания метана в многолетнемерзлых породах (Ривкина и др., 2006; Чербунина и др., 2017; Brouchkov, Fukuda, 2002 и другие), по западному сектору Российской Арктики данных о содержании метана крайне недостаточно.

В работе рассмотрены закономерности распределения содержания метана и его генезиса для основных стратиграфо-генетических комплексов Западной Арктики в трех репрезентативных для типичных и южных тундр участках: 1) районе устья реки Печора (Европейский Север), 2) районе метеостанции Марре-Сале (западное побережье полуострова Ямал), 3) районе поселка Тазовский (северо-восточная часть Пур-Тазовского междуречья).

Цель исследования: оценить влияние геокриологических и ландшафтных условий на содержание и динамику метана в мерзлых и протаивающих породах

основных геолого-стратиграфических комплексов четвертичных отложений в Западной Арктике в условиях потепления климата.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

- изучить эволюцию криолитозоны Западной Арктики в условиях меняющегося климата, включая изменения температуры многолетнемерзлых пород и глубины сезонного протаивания;
- определить статистически достоверное содержание метана в основных стратиграфо-генетических комплексах Западной Арктики;
- оценить влияние геокриологических и ландшафтных условий на содержание метана в мерзлых и протаивающих породах;
- установить роль криогенного строения, включая переходный слой, в содержании метана;
- оценить влияние климатических условий на содержание метана в протаивающих породах.

Объект исследования – многолетнемерзлые и протаивающие породы Западной Арктики.

Предмет исследования – содержание метана в мерзлых и протаивающих породах основных стратиграфо-генетических комплексов, его генезис и изотопный состав.

Научная новизна:

Впервые проведено комплексное системное исследование содержания метана в многолетнемерзлых и протаивающих породах основных стратиграфо-генетических комплексов четвертичных отложений Западной Арктики:

- 1) Впервые получены достоверные и статистически обоснованные показатели содержания метана в многолетнемерзлых и протаивающих породах основных стратиграфо-генетических комплексов четвертичных отложений.
- 2) Установлено, что каждый стратиграфо-генетический комплекс характеризуется индивидуальными показателями содержания метана – средним

содержанием и стандартным отклонением. Для всех типов ММП и подземных льдов характерно логнормальное распределение содержания метана.

3) Содержание метана в многолетнемерзлых породах и подземных льдах несет в себе четкий климатический сигнал. Породам и подземным льдам, сформировавшимся в теплые этапы позднего плейстоцена-голоцена, присущи более высокие содержания метана по сравнению с породами холодных этапов.

4) Доказано, что переходный слой содержит в два-пять раз больше метана по сравнению с сезонно-талым слоем (СТС) и может рассматриваться в качестве серьезного источника (пула) метана при деградации мерзлоты. Впервые для модельной территории построены оригинальные крупномасштабные карты содержания метана в сезонно-талом и переходном слоях.

5) Подтвержден биогенный генезис метана в многолетнемерзлых и протаивающих породах и подземных льдах. Получены новые подтверждения внутригрунтового (не гляциального) образования пластовых льдов в регионе.

6) Получены первые системные данные по изотопному составу метана в многолетнемерзлых и протаивающих породах и подземных льдах. Установлено явление сепарации изотопного состава метана в сезонно-талом слое при его эмиссии в атмосферу. Доказана важная роль диффузионного механизма в транспорте метана в сезонно-талом слое к дневной поверхности, даже в водонасыщенных породах с высоким содержанием метана. Еще большее значение диффузионный механизм переноса играет в дренированных породах.

Защищаемые положения

1. Каждый стратиграфо-генетический комплекс мёрзлых четверичных отложений Западной Арктики и подземные льды характеризуются уникальными показателями содержания метана, отражающими условия формирования и промерзания пород и подземных льдов и несущими в себе климатический «сигнал».

2. Переходный слой содержит гораздо больше метана по сравнению с СТС и является серьезным источником дополнительного поступления метана в атмосферу при его протаивании в условиях потепления климата.

3. Содержание метана в породах сезонно-талого слоя регулируется особенностями ландшафтов и возрастает по мере увеличения температуры воздуха, следовательно, вслед за градиентом температур существует и региональный градиент содержания метана в СТС. При прочих равных условиях в биоклиматической подзоне южных кустарниковых тундр в сезонно-талом слое содержится больше метана, чем в типичных тундрах.

Теоретическая и практическая значимость.

Результаты диссертации могут и должны быть использованы при оценках, расчетах и моделировании эмиссии метана в атмосферу при потеплении климата за счет более совершенного учета источников метана и их интенсивности. Полученные данные позволяют оценить высвобождение и поступление метана в атмосферу при деградации мерзлоты и опускании ее кровли.

Личный вклад автора.

С 2015 г. автор принимал участие в полевых и камеральных работах во всех трех изученных районах – устье р. Печора, Марре-Сале (Западный Ямал) и Тазовский. Все материалы, приведенные в диссертации, получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Использование опубликованных и архивных материалов и данных имеет соответствующие ссылки. В совместных публикациях вклад авторов равнозначен.

Достоверность результатов исследования

Полученные результаты и сделанные выводы и обобщения основываются на изучении, анализе и обработке данных десятков разрезов, шурфов и скважин, более 1300 образцов, отобранных в репрезентативных разрезах основных стратиграфо-генетических комплексов мерзлых и протаивающих пород региона, корректной статистической обработке полученных данных, согласии с имеющимися опубликованными данными и представлениями.

Апробация работы

Результаты исследований докладывались на 23 конференциях, в том числе 4 зарубежных. Всего по теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 2

статьи в журналах из списка ВАК, 2 статьи в рецензируемых иностранных журналах, 4 статьи в материалах конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и списка литературы. Объем диссертации 180 стр., включая 90 иллюстраций, 6 таблиц и список литературы из 152 наименований.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.г.-м.н. А.А. Васильеву, а также к.г.-м.н. Г.Е. Облогову за всестороннюю помощь в подготовке диссертации, советы по интерпретации и ценные замечания. Хотелось бы поблагодарить к.г.-м.н. И.Д. Стрелецкую, благодаря которой автор присоединилась к изучению метана в криолитозоне. Автор выражает искреннюю признательность сотрудникам ФГБУ ВНИИОкеангеология (Санкт-Петербург), особенно к.г.-м.н. Б.Г. Ванштейну и к.б.н. П.Б. Семенову, сотруднику Института микробиологии РАН имени С.Н. Виноградского (Москва) д.б.н. А.С. Саввичеву и к.г.-м.н. Е.М. Ривкиной (ИФХиБПП РАН, Пущино) за консультации и выполнение больших объемов различных лабораторных анализов. Автор благодарит к.г.н. Э.П. Зазовскую и всех сотрудников лаборатории радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии ИГ РАН за содействие в выполнении радиоуглеродного датирования образцов и трактовку результатов. Благодарность выражается к.г.-м.н. Г.В. Малковой и к.г.-м.н. А.В. Хомутову за включение автора в состав участников полевых работ и консультации. Автор выражает признательность коллегам Е.М. Бабкину, М.М. Данько, Е.А. Бабкиной, к.г.-м.н. Е.С. Королевой, к.т.н. М.Р. Садуртдинову, А.М. Цареву за помощь во время полевых работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе был выполнен обзор литературы, касающейся исследований содержания метана в мерзлых и протаивающих породах, а также эмиссии метана при деградации многолетнемерзлых пород (ММП). Большое

внимание было уделено значению и состоянию изученности исследования метана в мерзлых и сезонно-талых породах. В итоге, проведенный анализ современной литературы по метановой проблематике показал, что основной массив исследований посвящен оценкам эмиссии метана в разных регионах и при различных условиях, но его содержание в мерзлых и протаивающих отложениях разного возраста и генезиса, влияние геокриологических и ландшафтных условий на содержание и эмиссию метана изучены совершенно недостаточно.

Во второй главе приведена подробная характеристика природных условий регионов исследования (физико-географическое положение, климат, рельеф и ландшафтная структура). Собственные наблюдения выполнены в трех районах.

Стационар Болванский расположен на южном берегу Печорской губы (бассейн Баренцева моря) в пределах эродированной IV морской равнины. В 50 км к западу в Коровинской губе располагается остров Кашин, который относится к первой морской террасе. Участок Кумжа расположен в дельте реки Печора и представляет собой останец первой аллювиальной террасы.

На западном побережье полуострова Ямал, на поверхности третьей морской террасы, поймы реки Марре-Яха и на морской лаиде расположен геокриологический стационар Марре-Сале.

Вблизи поселка Тазовский исследования проводились на поверхности III озерно-аллювиальной равнины.

В устье р. Печоры и вблизи поселка Тазовский все изученные участки расположены в подзоне южной кустарниковой тундры, район Марре-Сале относится к подзоне типичной тундры.

На рассматриваемых территориях выявлена тенденция к потеплению климата, которая выражается в повышении среднегодовой температуры воздуха и летних температур воздуха, увеличении продолжительности теплого периода и возрастании количества выпадающих осадков.

В третьей главе описаны геологические и геокриологические условия всех изученных районов. Рассмотрены распространение, мощность и строение ММП, включая переходный слой, температурный режим пород и динамика сезонного протаивания.

В дельте р. Печоры на стационаре Болванский ММП имеют сплошное распространение, их мощность составляет 100-200 м. Участки Кашин и Кумжа относятся к зоне островного распространения ММП. Мощность ММП на острове Кашин составляет 30-40 м, на участке Кумжа кровля мерзлоты имеет куполообразную форму и имеет глубину залегания от поверхности в интервале от 2,6 м до 7,1 м.

Район Марре-Сале относится к зоне сплошного распространения низкотемпературных засоленных многолетнемерзлых пород с двухслойным строением. Мощность твердомерзлой толщи доходит до 90 м, ниже залегают пластично-мерзлые породы, не содержащие ледяных включений.

Район п. Тазовского также относится к зоне сплошного распространения ММП с двухслойным строением, мощность которых около 300-400 м.

В четвертой главе описана методика изучения содержания метана в мерзлых и протаивающих породах, включая методы полевых и лабораторных исследований. В полевые исследования входят: описание шурфов, обнажений, скважин, изучение температурного режима пород и ландшафтной структуры территорий, отбор образцов на различные виды анализов, в том числе на газовый состав, а также полевое определение влажности пород. К лабораторным методам исследования относятся: определение гранулометрического состава отложений, газового состава, содержания органического углерода в породах, определение изотопного состава газов, а также радиоуглеродное датирование образцов.

На геокриологическом стационаре Марре-Сале изучение содержания метана проводилось с 2012 по 2022 гг., в районе устья реки Печора исследования велись в 2020-2022 гг., а вблизи поселка Тазовский – в 2021 году.

В связи с высокой изменчивостью содержания метана в ММП и породах СТС в качестве основного методического приема было использовано массовое

опробование разрезов, колонок скважин и шурфов с последующей статистической обработкой данных. Это позволило получить статистически достоверные показатели содержания метана в мерзлых и протаивающих породах основных стратиграфо-генетических комплексов и подземных льдах.

В качестве метода отбора проб на определение газовой компоненты был выбран «Headspace» из-за удобства его использования в полевых условиях и исследования образцов пород небольшого размера.

Всего было отобрано и проанализировано 1388 проб на содержание метана, из них 520 образцов было взято из талых и охлажденных пород, 639 – из мерзлых, 233 пробы отобраны из льда.

В пятой главе был приведен комплексный анализ содержания метана в мерзлых и протаивающих породах, в подземных льдах, а также исследован изотопный состав метана.

Анализ полученных данных показал, что наблюдается высокая изменчивость значений содержания метана в зависимости от состава, генезиса и криогенного состояния отложений. Полученные данные организованы в компьютерную базу данных в формате Excel, в которой приведен идентификационный номер образца, лабораторный номер, состав породы, физическое состояние (талый или мерзлый), место, глубина и дата отбора, геологический возраст и генезис, лабораторное значение содержания метана, истинное содержание метана, служебная информация по образцу (вес, объем, объем газовой фазы и т.п.), литературные ссылки (в случае заимствования).

В устье р. Печоры наибольшие значения метана отмечаются в мерзлых голоценовых торфах. Средние значения содержания метана в талых породах значительно меньше, чем в подстилающих мерзлых (0,3 мл/кг в талом песке, 1,3 мл/кг – в мерзлом, 0,2 мл/кг в талом торфе, 5,9 мл/кг – в мерзлом).

В районе Марре-Сале максимальные концентрации отмечаются в мерзлых голоценовых (МИС 1) аллювиальных породах и торфе (до 2 мл/кг), меньше метана содержится в сартанских (МИС 2) песках и супесях (среднее значение 0,5 мл/кг), в каргинских песках, супесях и суглинках содержание метана вновь

возрастает до 0,71 мл/кг. Наибольшее количество CH_4 зафиксировано в казанцевских (МИС 5) глинах и суглинках (среднее 1,7 мл/кг), залегающих в основании разреза.

На территории стационара Марре-Сале содержание метана было изучено в голоценовых и сартанских повторно-жильных льдах (ПЖЛ), а также в пластовых льдах на контакте морских суглинков с континентальными супесями и песками (ПЛ 1), и пластовых льдах, залегающих в толще казанцевских суглинков и глин (ПЛ 2). В повторно-жильных льдах количество метана меньше, чем в пластовых льдах. Среднее содержание метана в ПЖЛ голоценового возраста составляет 0,93 мл/кг, сартанских ПЖЛ – 0,62 мл/кг. Значения CH_4 в ПЛ 1 – 0,9 мл/кг, в ПЛ 2 концентрации выше – 1,13 мл/кг. Высокое содержание метана в пластовых льдах подтверждает их внутригрунтовое происхождение, когда источником метана является его поступление из промерзающих вмещающих толщ и подземных вод богатых метаном, тогда как ПЖЛ формируются за счет талых атмосферных осадков и снега с низким содержанием метана. Хорошая изученность позволила построить разрез, на котором отражено содержание метана в каждом стратиграфо-генетическом комплексе и типе подземных льдов (рисунок 1).

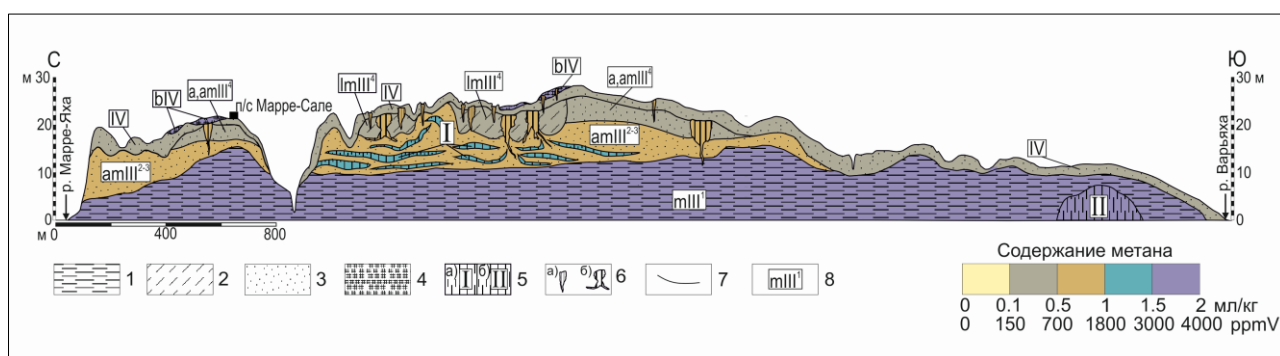


Рисунок 1 – Распределение содержания метана в основных стратиграфо-генетических типах отложений и подземных льдах района Марре-Сале. 1 – глины, суглинки; 2 – супеси; 3 – пески; 4 – торф; 5 – пластовые льды: а) первого типа, б) второго типа; 6 – полигонально-жильные льды: а) голоценовые (МИС 1), б) позднеплейстоценовые (МИС 2); 7 – геологические границы; 8 – геолого-генетический индекс отложений

Для выявления закономерностей содержания метана в подземных льдах были проанализированы также данные по району Сопочной Карги по данным (Стрелецкая и др., 2018; Maschenko et al., 2017) и архивным материалам. В голоценовых ПЖЛ среднее содержание метана составляет 0,08 мл/кг, а в сартанских ПЖЛ еще ниже – 0,06 мл/кг, в пластовом льду – 0,42 мл/кг. Все значения существенно ниже, чем в районе Марре-Сале. Вероятно, это объясняется более суровым климатом Сопочной Карги в голоцене и конце плейстоцена, который создал неблагоприятные условия для образования и накопления метана по сравнению с изученными участками к западу.

Вблизи поселка Тазовский максимальными содержаниями метана характеризуется голоценовый торф (в среднем 9,6 мл/кг). В каргинских супесчано-суглинистых породах среднее содержание метана составляет 4,95 мл/кг. Содержание метана в голоценовых ПЖЛ составляет 0,33 мл/кг.

Сравнение средних содержаний метана в ПЖЛ в целом по региону показало, что количество метана в голоценовых ПЖЛ снижается с увеличением суровости климата с запада на восток. Содержание метана в сартанских ПЖЛ всегда ниже по сравнению с голоценовыми (рисунок 2), что может служить маркером суровости климата при палеогеографических реконструкциях.

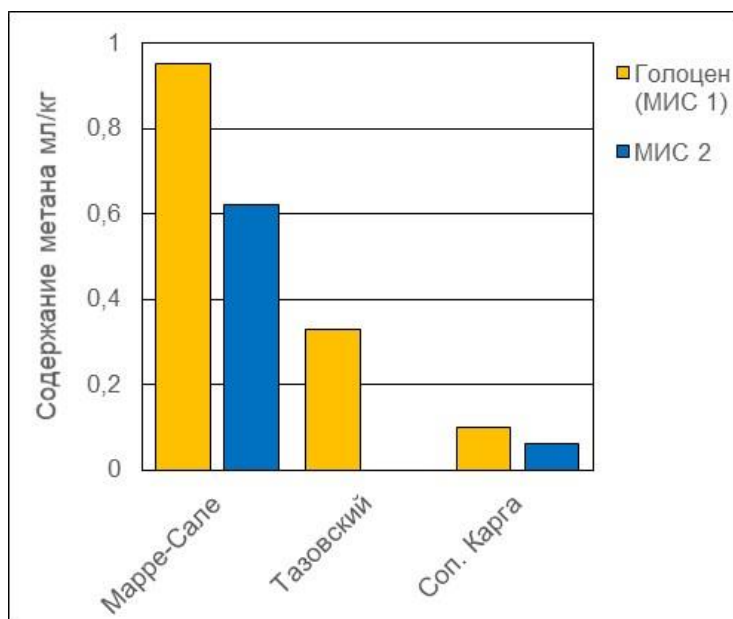


Рисунок 2 – Соотношение содержания метана в ПЖЛ голоценового и сартанского возраста в Западной Арктике

Для содержания метана во всех типах ММП и подземных льдов характерно приближение к логнормальному распределению. Несмотря на высокую изменчивость показателей концентраций метана в ММП и подземных льдах, достаточная статистическая обеспеченность данных позволяет сделать корректные сравнения содержания метана в многолетнемерзлых породах разного возраста. На рисунке 3 приведено соотношение величин содержания метана для основных стратиграфо-генетических комплексов Западной Арктики.

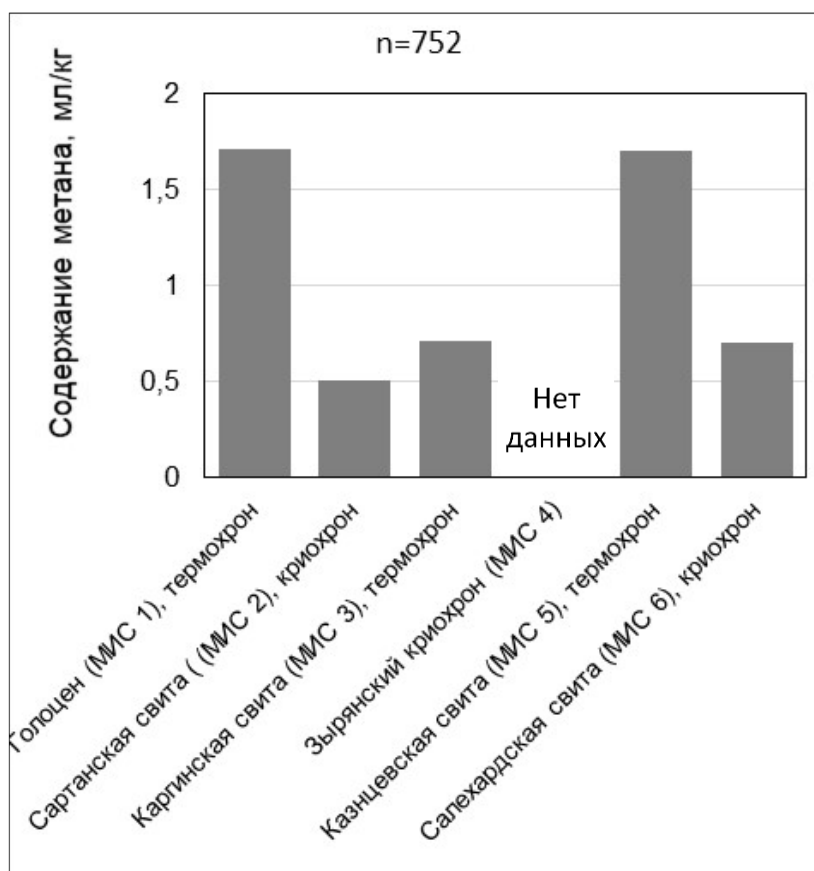


Рисунок 3 – Средние содержания метана в основных стратиграфо-генетических комплексах (от МИС 6 до МИС 1) Западной Арктики (n – общее количество образцов)

Как видно из рисунка 3, для каждого стратиграфо-генетического комплекса характерно собственное (уникальное) значение показателя. При этом, теплым термохронам во всех случаях соответствуют более высокие содержания метана по сравнению с холодными криохронами.

Таким образом, полученные данные позволили обосновать первое защищаемое положение: **каждый стратиграфо-генетический комплекс мёрзлых четверичных отложений Западной Арктики и подземные льды характеризуются уникальными показателями содержания метана, отражающими условия формирования и промерзания пород и подземных льдов и несущими в себе «климатический «сигнал».**

В сезонно-талом (СТС) и переходном слоях очень большое влияние на содержание метана оказывают ландшафтные условия – рельеф, состав и увлажненность пород, содержание органического углерода в отложениях, растительность и т.п.

На площадке Кумжа на дренированной поверхности породы СТС имели очень низкое содержание метана в СТС (максимально – 0,28 мл/кг), а в заболоченном понижении содержание метана в СТС возрастает до 0,7 мл/кг.

На о. Кашин на увлажненной поверхности полигональной тундры содержание метана в породах СТС от 0,005 до 2,5 мл/кг, что превышает показатели на Кумже. В содержании метана выявлено возрастание значений метана в подстилающих мерзлых породах по сравнению с талыми.

На мысе Болванский шурф на заболоченной поверхности полигональной тундры показал содержания метана от 0,01 до 1,9 мл/кг в талых породах и от 0,1 до 1,7 мл/кг – в мерзлых. В шурфе на переувлажненной поверхности небольшого полигонального торфяника концентрации метана составляют 0,01-0,4 в талых отложениях, 0,06-0,3 мл/кг в мерзлых породах.

В районе геокриологического стационара Марре-Сале было изучено содержание метана в породах СТС и подстилающих ММП во всех доминантных ландшафтах типичных тундр.

Высокие или заметные содержания метана присущи только ландшафтам заболоченных и увлажненных тундр. Здесь содержание метана меняется в пределах 1-10 мл/кг. В ландшафтах дренированных и слабодренированных тундр содержание метана мало (минимально 0,001...0,1 мл/кг на песчаных

раздувах). Это связано с отсутствием условия анаэробности в этих ландшафтах и невозможностью продуцирования метана анаэробными бактериями.

Наибольшие содержания метана характерны для ландшафтов болот, логов стока, озерных понижений, заболоченной поймы и морской лайды из-за благоприятных условий анаэробности. Но из-за сравнительно небольшой площади вклад этих ландшафтов в баланс углерода относительно невелик.

Достаточная обеспеченность данными позволила построить в качестве примера карты содержания метана для района Марре-Сале в породах сезонно-талого и переходного слоев, где отчетливо видно повышенное содержание метана в подстилающих мерзлых горизонтах по сравнению с породами СТС (рисунок 4).

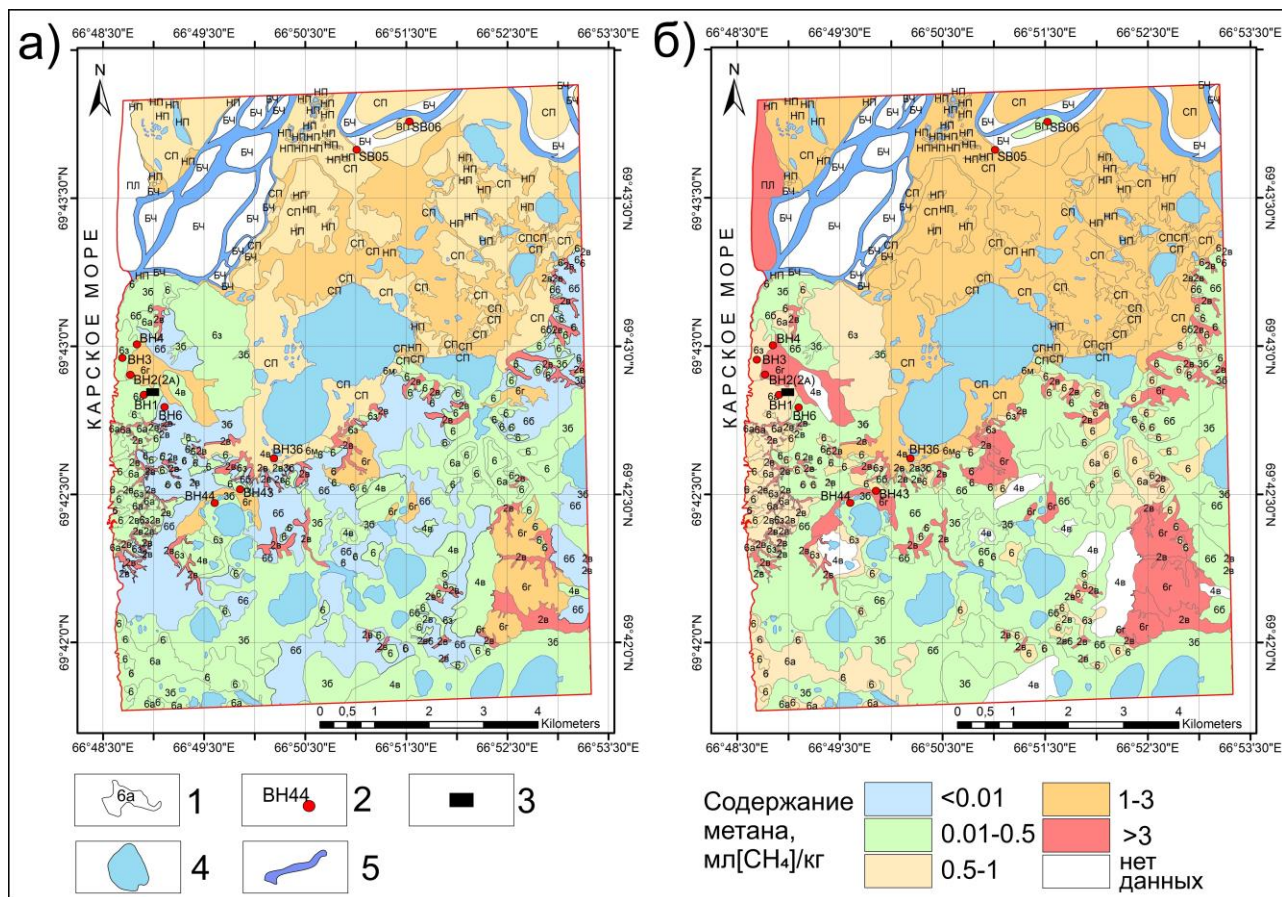


Рисунок 4 - Карты среднего содержания метана в доминантных ландшафтах района Марре-Сале (Задорожная и др., 2022) в: а) талых породах СТС, б) в мерзлых породах переходного слоя

Вблизи поселка Тазовский все исследования были проведены на голоценовых торфяниках. Все торфяники были разделены в зависимости от

увлажненности поверхности. С увеличением увлажнения поверхности содержание метана в талых породах возрастает.

В талых породах СТС в увлажненных ландшафтах содержание метана составляет около 3,3 мл/кг, а в мерзлых до 9,5 мл/кг, в дренированных талых торфяниках понижается до 0,1 мл/кг. Итак, во всех торфяниках, независимо от степени увлажненности, отмечается превышение содержания метана в мерзлых породах по сравнению с талыми.

Анализ результатов показал, что для всех трех участков исследования, отличающихся по геокриологическим условиям, климату и биоклиматическим зонам, присуща одна и та же закономерность, обосновывающая второе защищаемое положение: **Переходный слой содержит гораздо больше метана по сравнению с сезонно-талым слоем и является серьезным источником дополнительного поступления метана в атмосферу при его протаивании в условиях потепления климата.** По нашим данным содержание метана в мерзлых породах переходного слоя в два-пять раз выше, чем в протаивающих породах сезонно-талого слоя. Мощность переходного слоя с повышенным содержанием метана достигает от двух до пяти метров.

Для оценки влияния климата на содержание метана корректно сравнивать концентрации метана в одинаковых ландшафтах, но обе биоклиматические подзоны характеризуются собственной ландшафтной структурой из зональных ландшафтов. Азональными ландшафтами, представленными в обеих подзонах, являются болота.

Полученные данные позволили проследить влияние температуры на содержание метана в одинаковых ландшафтах болот и осреднённо для всех ландшафтов тундр. На рисунке 5 представлены зависимости содержания метана отдельно для болот (зеленая линия) и средняя для всех ландшафтов в обеих биоклиматических зонах (лиловая линия).

Измерения проводились в разные даты и годы, поэтому в качестве меры тепла, поступающего в грунт, принята сумма положительных температур от даты перехода температуры воздуха через ноль до даты проведения отбора проб.

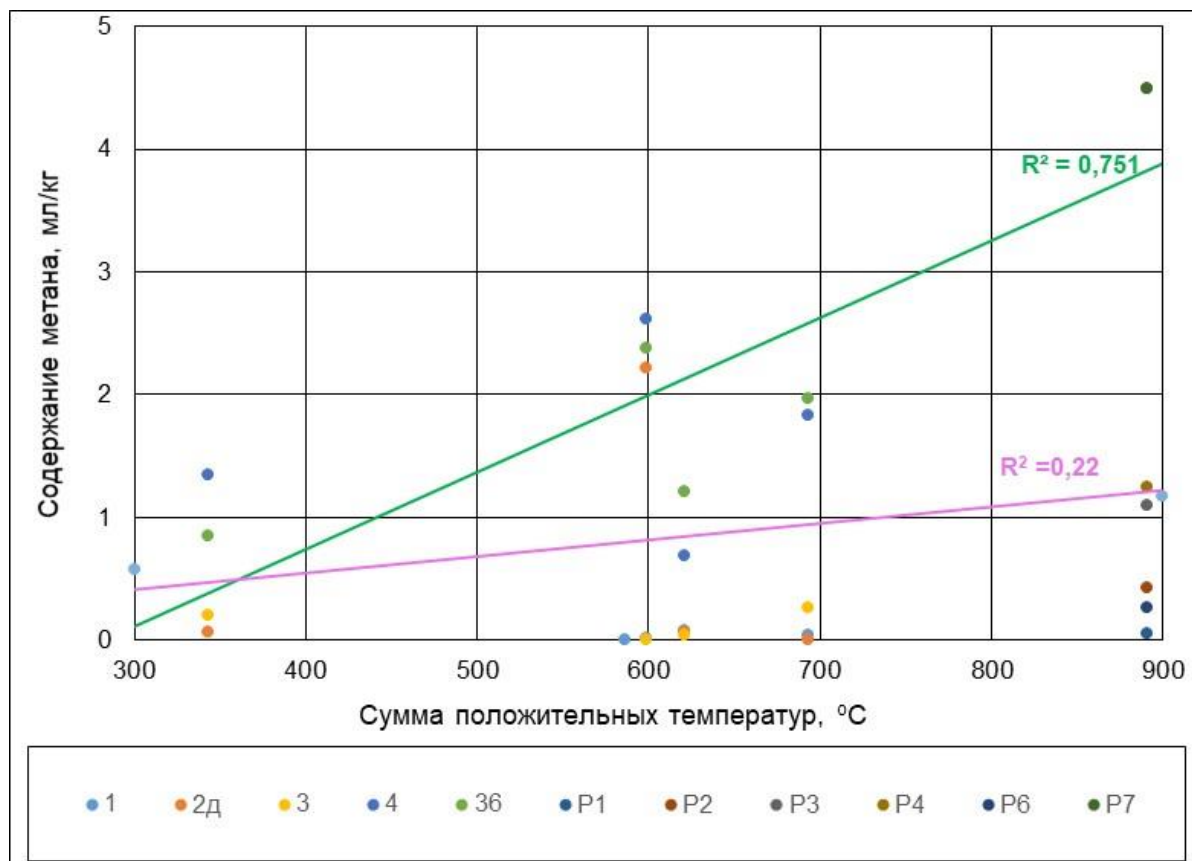


Рисунок 5 – Соотношение между содержанием метана в СТС и суммой положительных температур в доминантных ландшафтах. Зеленая линия – тренд для ландшафтов болот в типичных и южных тундрах, лиловая линия – осредненный тренд по всем ландшафтам тундр. В легенде – номера площадок

Из рисунка видно, что при сравнении болот предполагаемая зависимость уверенно подтверждается. Коэффициент детерминации достигает 0,751. Коэффициент детерминации, рассчитанный для всей совокупности данных, составляет всего 0,22, что связано с высокой естественной изменчивостью содержания метана в породах от ландшафта к ландшафту и влиянием низких концентраций метана в дренированных ландшафтах. С учетом ландшафтной структуры изученных подзон типичной и южной кустарниковой тундр можно считать, что серьезными источниками метана являются менее 40% общей площади тундр. Это условие сохранится и при потеплении климата.

Итак, можно заключить, что при повышении температуры (суммы положительных температур) в СТС наблюдается возрастание содержания

метана. Это объясняется ускоренным метаболизмом метаногенных архей и изменением их видового состава по мере повышения температуры среды.

Полученные результаты обосновывают третье защищаемое положение: **Содержание метана в породах сезонно-талого слоя регулируется особенностями ландшафтов и возрастает по мере увеличения температуры воздуха, следовательно, вслед за градиентом температур существует и региональный градиент содержания метана в СТС. При прочих равных условиях в биоклиматической подзоне южных тундр в сезонно-талом слое содержится больше метана, чем в типичных тундрах.**

В работе были проанализированы первые полученные данные по изотопному составу метана в мерзлых и протаивающих породах и подземных льдах. Всего изотопный состав метана был определен в 128 образцах, в том числе $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ – в 128 образцах, $\delta\text{D}(\text{CH}_4)$ – в 12 образцах.

Биогенный генезис образования метана в мерзлых и протаивающих породах и подземных льдах подтверждается результатами анализов метана по соотношению изотопов $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ и $\delta\text{D}(\text{CH}_4)$ в районе Марре-Сале, а также по определению изотопа $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ в других районах (анализ изотопного состава анализировался по диаграмме (Whiticar, 1999)).

В дельте реки Печора разброс значений в талых породах составляет от -65,8 до -42 ‰, в мерзлых – от -77,1 до -46,1 ‰. В районе Марре-Сале значения изотопного состава лежат в области от -79,8 ... -52,6 ‰ в талых породах и до -87,8 ... -53,9 ‰ в мерзлых. Для Пур-Тазовского междуречья замечен более значительный разброс значений в талых отложениях (от -81,2 до -40,1 ‰) по сравнению с мерзлыми (от -77,5 до -53,9 ‰). Перенос метана в породах СТС может быть обусловлен двумя основными механизмами – пузырьковым и диффузионным.

Сравнение характера распределения изотопного состава и содержания метана по глубине позволяет сделать вывод о значительном вкладе диффузионного механизма в транспорт метана из сезонно-талого слоя к поверхности даже в условиях полного водонасыщения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволили выявить зависимость содержания метана в мерзлых и протаивающих породах основных геолого-стратиграфических комплексов четвертичных отложений в Западной Арктике от геокриологических и ландшафтных условий и дать оценки содержания метана в доминантных ландшафтах Западной Арктики при потеплении климата.

Основные научные результаты:

1) Проведен анализ изменения климата в обширном регионе по данным ключевых метеостанций. Потепление климата происходит, начиная с 1970-х гг., синхронно, но с разными амплитудами. Для западной части региона скорость повышения среднегодовой температуры составила 0,06 °C/год, на Западном Ямале – 0,055 °C/год, в районе Тазовского – 0,072 °C/год. Наблюдается повышение не только среднегодовой, но и средней летней температуры воздуха.

2) Изучены геокриологические условия трех ключевых участков в динамике на фоне потепления климата. На основе статистической обработки данных по влажности (льдистости) пород по разрезу установлено, что повсеместно распространен переходный слой, залегающий непосредственно под слоем сезонного протаивания. Мощность переходной зоны, включающей переходный и промежуточный слой, на Европейском Севере может достигать 5-6 м, в Западной Сибири – около 2 м.

Среднегодовая температура многолетнемерзлых пород в районе мыса Болванского (устье р. Печоры) со сплошным распространением ММП повысилась с -2,1...-2,3 °C (1984) до -0,6...-1,2 °C (2022). В Марре-Сале среднегодовая температура ММП также повысилась с -4,6...-7,5 °C (1978) до -2,4...-4,5 °C (2022). В районе Тазовского нет продолжительных наблюдений за температурой ММП, но среднегодовая температура также имеет тенденцию к повышению с -2,7 °C (2016) до -2,2 °C (2022).

На фоне потепления климата для всей территории характерно увеличение глубины сезонного протаивания. Среднемноголетний тренд на площадке CALM Болванский (R24) составляет 0,3 см/год, на площадке CALM на острове Кашин

(R24A) фиксируется более высокий тренд к оттаиванию пород (3,7 см/год). Тренд для района Марре-Сале по площадке CALM составляет около 0,4 см/год. В Тазовском наблюдается тренд увеличения сезонного протаивания в 2 см/год.

3) Изучено содержание метана по данным более 1300 проб мерзлых, талых пород и подземных льдов. Сформирована компьютерная база данных. Показано, что содержание метана описывается логнормальным распределением.

Установлено, что мерзлые породы основных стратиграфо-генетических комплексов Западной Арктики характеризуются уникальными и отличающимися от комплекса к комплексу величинами содержания метана. Максимальное содержание метана отмечается в современных аллювиальных отложениях и торфах (МИС 1) и морских отложениях казанцевского возраста (МИС 5), достигая 1,7 мл/кг. В породах каргинского возраста (МИС 3) содержание метана около 0,7 мл/кг, а в сартанских (МИС 2) – 0,5 мл/кг. Таким образом, максимальные содержания метана наблюдаются в породах, сформировавшихся в теплые этапы (термохроны), а минимальные – в холодные этапы (криохроны).

Влияние климатических условий на содержание метана уверенно подтверждается данными по полигонально-жильным и пластовым льдам. Наибольшие содержания метана наблюдаются в голоценовых ПЖЛ, сартанские ПЖЛ, сформировавшиеся в условиях более холодного климата, характеризуются существенно более низким содержанием метана. Установлено также, что содержание метана в голоценовых и сартанских ПЖЛ снижается по мере увеличения суровости климата с запада на восток.

4) На примере ключевых участков в полевых условиях и на основе спутниковых данных изучена ландшафтная структура территории. Построены крупномасштабные ландшафтные карты исследованных участков.

Изучено содержание метана в породах сезонно-талого слоя и подстилающих ММП во всех доминантных ландшафтах региона. Показано, что решающее значение имеют литология и условия увлажнения ландшафтов. В заболоченных ландшафтах содержание метана в устье р. Печоры достигает 2,5

мл/кг, в то время как в ландшафтах разной степени дренированности – менее 0,5 мл/кг. В Марре-Сале также наибольшие содержания метана присущи пойменным болотам – до 1,7 мл/кг и логам, ложбинам стока – до 1 мл/кг. В районе Тазовского содержание метана изучалось в торфяниках. Торф характеризуется максимальными значениями содержания метана, достигающими 9,5 мл/кг.

С учетом ландшафтной структуры изученных подзон типичной и южной кустарниковой тундр можно считать, что серьезными источниками метана даже при потеплении климата являются не более 40% общей площади тундр.

5) Достоверно установлено, что многолетнемерзлые породы переходного слоя на всех исследованных разрезах содержат в 2-5 раз больше метана по сравнению с вышележащими породами сезонно-талого слоя. Это позволяет говорить о высоком вкладе метана из переходного слоя в эмиссию при потеплении климата и деградации мерзлоты. Впервые составлены крупномасштабные карты содержания метана в сезонно-талом и переходном слоях для модельной территории, наглядно иллюстрирующие высокие запасы метана в переходном слое.

6) Впервые оценено влияние климата на содержание метана в породах СТС. Фактические наблюдения показали, что повышение температуры воздуха вызывает возрастание содержания метана в породах СТС из-за интенсификации метаногенеза. Это позволяет утверждать, что вслед за региональным градиентом температур существует и градиент содержания метана в СТС. При прочих равных условиях в биоклиматической подзоне южных кустарниковых тундр в СТС содержится больше метана, чем в типичных тундрах.

7) Впервые был целенаправленно изучен изотопный состав метана в трех исследованных районах в биоклиматических зонах типичной и южной кустарниковой тундры. На большом массиве данных доказан биогенный генезис метана в мерзлых и протаивающих четвертичных породах Западной Арктики.

Установлено, что в СТС происходит сепарация метана по изотопному составу (утяжеление изотопного состава вблизи дневной поверхности) за счет

потери легкого метана при его эмиссии и вследствие потребления легкого метана метанотрофными бактериями. Изотопные исследования позволили установить существенную роль диффузионного механизма транспорта метана в сезонно-талом слое к дневной поверхности как в заболоченных и водонасыщенных ландшафтах, так и, в особенности, в дренированных ландшафтах.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Васильев А.А., Мельников В.П., **Задорожная Н.А.**, Облогов Г.Е., Стрелецкая И.Д., Саввичев А.С. Содержание и эмиссия метана в типичных и южных тундрах Западной Арктики // Доклады Российской Академии Наук. Наука о земле. – 2022. – Том 505. – № 1. – С. 113-118.
2. **Задорожная Н.А.**, Облогов Г.Е., Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Малкова Г.В., Семенов П.Б., Ванштейн Б.Г. Метан в мерзлых и оттаивающих отложениях Западной Арктики / Криосфера Земли. – 2022. – Том 26. – № 5. – С. 41-55.

Статьи в рецензируемых научных изданиях:

1. Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskaya I.D., **Zadorozhnaya N.A.**, Kuznetsova A.O., Kanevskiy M.Z., Semenov P.B. Methane Content and Emission in the Permafrost Landscapes of Western Yamal, Russian Arctic // Geosciences. – 2020. – 10. – № 412. – 21 p. doi:10.3390/geosciences10100412.
2. Streletskaya I.D., Pismeniuk A.A., Vasiliev A.A., Gusev E.A., Oblogov G.E., **Zadorozhnaya N.A.** The Ice-Rich Permafrost Sequences as a Paleoenvironmental Archive for the Kara Sea Region (Western Arctic) // Frontiers in Earth science. – 2021. – V. 9. – 16 p. doi: 10.3389/feart.2021.723382.

Публикации в других изданиях:

1. **Задорожная Н.А.**, Облогов Г.Е., Васильев А.А. Содержание метана в мерзлых и оттаивающих породах в ландшафтах западного побережья полуострова Ямал // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне», посвященной 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (Якутск, 28-30 сентября 2020 г.). – Якутск, 2020. – С. 263-266.
2. **Задорожная Н.А.**, Облогов Г.Е., Васильев А.А. Содержание метана в слое сезонного оттаивания и верхнем горизонте мерзлоты в районе Марре-Сале (Ямал) и устья р. Печоры // Материалы VI всероссийского научного молодежного геокриологического форума с международным участием,

посвященного 100-летию со дня рождения ученых-мерзлотоведов Е.М. Катасонова и Н.П. Анисимовой «Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии» (Якутск, 28 июня-13 июля 2021 г.). – Якутск, 2021. – С. 103-105.

3. **Задорожная Н.А.**, Облогов Г.Е., Васильев А.А. Содержание метана в многолетнемерзлых, периодически оттаивающих породах и подземных льдах в районе Марре-Сале (западное побережье полуострова Ямал) и устья реки Печора // Сборник тезисов Международной научно-практической конференции «Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике» (Салехард, 8-12 ноября 2021 г.) / Под ред. В.П. Мельникова и М.Р. Садуртдинова. – Салехард, 2021. – С. 157-160.

4. **Задорожная Н.А.**, Облогов Г.Е., Васильев А.А., Малкова Г.В. Обновленные данные по содержанию метана в талых и мерзлых отложениях Западного сектора Арктики // VII Всероссийский научный молодёжный геокриологический форум с международным участием «Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии» (г. Якутск, 27 июня – 07 июля 2023 г.). – Якутск, 2023. – С. 64-67.