

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Чербунина Мария Юрьевна

**ОСОБЕННОСТИ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА И МИКРООРГАНИЗМОВ
В МЕРЗЛЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ**

Специальность 1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение и
грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – **Брушков Анатолий Викторович**,
доктор геолого-минералогических наук
- Официальные оппоненты** – **Якушев Владимир Станиславович**,
доктор геолого-минералогических наук,
ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», факультет разработки нефтяных и газовых месторождений, кафедра разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений, профессор
- Алексеев Сергей Владимирович**,
доктор геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник,
ФГБУН «Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук», лаборатория гидрогеологии, заведующий лабораторией
- Колотилова Наталья Николаевна**,
доктор биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», биологический факультет, кафедра микробиологии, доцент

Защита диссертации состоится 16 декабря 2022 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.1 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, РФ, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/507519913/>

Автореферат разослан 16 ноября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук,
доцент

Н.А. Харитонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы связана с необходимостью изучения газовой и микробной компоненты мерзлых пород, которые, находясь в тесной взаимосвязи между собой и остальными компонентами (частицами породы, льдом, жидкой фазой) остаются самыми неизученными. Интерес к газовой составляющей мерзлых пород в последние годы связан с выявлением значительной эмиссии парниковых газов в Арктике, обнаружению ранее неизвестных процессов в криолитозоне — образования воронок за счёт газового выброса, а также с выбросами газа при бурении скважин в мерзлых породах, осложняющими работы на месторождениях углеводородов. Вследствие климатических изменений значительные запасы углерода и других элементов, тысячелетиями аккумулированные в многолетнемерзлой толще, вовлекаются в глобальный биогеохимический круговорот. Из-за протаивания, в атмосферу поступают парниковые газы, как уже содержащиеся в мерзлых отложениях, так и вновь образующиеся вследствие переработки освобождающегося углерода микроорганизмами. В связи с этим возникает необходимость определения закономерностей образования и распределения метана в мерзлых толщах, а также микробных сообществ — как для уточнения вклада этих параметров в глобальные биогеохимические циклы, так и для определения условий их образования.

Постоянное воздействие отрицательных температур и определенные основные физико-химические параметры делают мерзлоту одной из стабильных и сбалансированных экосистем. При этом основная часть работ, касающаяся микроорганизмов в мерзлых отложениях, имеет преимущественно биологическую направленность, выявляя свойства микроорганизмов, стратегий выживания и т. д. Еще не так давно основными были методы классической биологии, в основе которых лежит культивирование микроорганизмов и которые позволяют всесторонне изучать свойства выделенной культуры, но при этом выделялось около 1% всего сообщества. Сейчас, благодаря доступности молекулярно-биологических методов, появился новый инструмент, позволяющий определять практически весь состав сообщества микроорганизмов. В то же время, состав и функции микробных сообществ могут являться новым, дополнительным инструментом для изучения условий формирования мерзлых отложений.

Целью работы является выявление закономерностей распределения концентрации метана и микробных сообществ в верхних горизонтах мерзлых пород, наиболее подверженных деградации при потеплении климата, в различных районах Центральной Якутии и установление принципиальной возможности их использования как индикаторов условий формирования мерзлых отложений.

Для достижения этой цели поставлены следующие *задачи*:

1. Выполнить описание разрезов обнажений и скважин, провести отбор образцов пород и льда для определения их свойств, газового состава, стабильных изотопов воды, микробиологического анализа в различных районах Центральной Якутии.

2. Установить закономерности распределения метана и его генезис для различных типов мерзлых отложений Центральной Якутии.

3. Установить закономерности изменения состава микробных сообществ молекулярно-биологическими методами и возможность применения этих данных в комплексе с другими методами для восстановления истории формирования мерзлых отложений.

Объектами исследования являются газовая компонента и микробные сообщества мерзлых пород и подземных льдов различного возраста, генезиса и условий залегания в Центральной Якутии.

Предметом исследования являются закономерности изменения газовой фазы и микробных сообществ в мерзлых отложениях различного возраста и генезиса.

Личный вклад автора. Работа базируется на материалах полевых, лабораторных и аналитических исследований, выполненных непосредственно автором или при его прямом участии. Автор руководил и участвовал в экспедиционных работах в Центральную Якутию в 2011–2012, 2016–2017 и 2021 гг., на основании материалов которых написана данная работа. Лично автором изучены и описаны геокриологические разрезы на обнажениях Мамонтова гора, оз. Сырдах, проводилось описание при бурении на урочище Нелегер Центральной Якутии. Лично автором отобраны 128 образцов газа, 13 монолитов для микробиологического анализа, 130 образцов для определения водно-физических и химических свойств пород и льда, а также содержания углерода, отобраны 75 образцов для определения стабильных изотопов воды, отобраны образцы для датировок. Автор непосредственно принимал участие в последующей обработке лабораторных данных, в частности, определении содержания газовой фазы и концентрации метана (полностью), водно-физических и химических свойств (частично), микробиологических работах (частично). Обобщение полевых и аналитических данных, их анализ и интерпретация, выявление закономерностей, составление текстовых и графических материалов выполнены лично автором.

Научная новизна исследований:

1. Получены новые данные о содержании, распределении и генезисе метана в верхних горизонтах мерзлых пород Центральной Якутии. Установлено, что распределение метана в мерзлых породах и льдах отличается значительной изменчивостью по глубине и простиранию как между различными горизонтами, так и в пределах одного горизонта, при этом различия возрастают с увеличением средней концентрации. Установлено, что данные о различной концентрации метана являются показателем различий в условиях формирования отложений.

2. Установлены различия в концентрации метана в отложениях ледового комплекса V и VI террас правого и левого берега р. Лены, и V террасы р. Алдан. Высокие значения концентрации (до 1 %) встречены только в ледовых комплексах, где полигонально-жильные льды (ПЖЛ) развиты в пылеватых песчаных-супесчаных отложениях, которые характеризуются низким содержанием органического углерода. Это, вероятно, свидетельствует о разных ведущих факторах в формировании ледового комплекса (ЛК).
3. Установлены значительные различия в концентрации метана в отложениях аласов – от практически полного отсутствия метана, до значений в десятки процентов. Такие различия не связаны с особенностями распределения метана в ЛК, по которому происходило формирование аласов, а обусловлены стадиями промерзания аласов. Если промерзание аласа начало происходить в его активной стадии, на стадии обводненности, концентрация метана сохраняется. В таком случае по глубине, до которой распространены высокие концентрации, можно косвенно судить о максимальной мощности протаивания аласа. При переходе аласа в субаэральные условия возможно выделение накопившегося метана из отложений до их промерзания.
4. Подстилающие ледовый комплекс Мамонтовой горы аллювиальные песчаные отложения неоген-среднеплейстоценового возраста содержат большие количества метана и характеризуются неравномерным распределением газа, с концентрацией от долей процента до 16,5 %, что необходимо учитывать при оценке эмиссии метана из размываемых речных берегов. Максимальные значения концентрации метана приурочены к синкриогенными мерзлым пескам среднего плейстоцена.
5. Впервые получены данные по составу микробных сообществ методами 16S рРНК для обнажений ледового комплекса Центральной Якутии и показано, что на основе этих данных можно выявлять отложения, различные по возрасту и условиям промерзания.
6. Установлено сходство микробного состава повторно-жильного льда и вмещающих отложений в мерзлых сингенетических отложениях ледового комплекса, при этом значительные различия отмечены в отложениях эпигенетического типа.
7. Установлено соответствие между происхождением ледяных жил (на основании изотопно-гидрохимического состава подземного льда) и содержащимся в них микробным сообществом. Выявлены микробные сообщества, характерные для горизонтов, которые подвергались оттаиванию и в последующем промерзанию.
8. Состав углерода метана ледового комплекса Центральной Якутии характеризуется более высоким содержанием тяжелого изотопа ($\delta^{13}\text{C}$ от $-49,3$ ‰ до $-64,5$ ‰), чем ледовый комплекс Северо-Востока ($\delta^{13}\text{C}$ от -64 до -99 ‰), что связано, вероятно, со смешением термогенного метана (возможно, из угольных пластов неогеновых или меловых отложений, мигрировавшим через мерзлую толщу) с биогенным метаном, который продуцировался одновременно с формированием отложений.

Обоснованность и достоверность результатов исследований основывается на:

1) использовании стандартных методик, применяемых в геокриологии и микробиологии для обработки и анализа материала, полученного в ходе полевых и лабораторных исследований; 2) значительном объеме полученных данных и их соответствии с результатами, полученными другими авторами в данных областях исследований; 3) использовании при лабораторных исследованиях современного высокоточного оборудования; 4) апробации основных научных положений на научных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

Практическая значимость: Полученные данные по распределению и генезису метана в мерзлых толщах могут быть использованы для оценок запасов метана в Центральной Якутии и для более точного учета в прогнозных моделях эмиссии. Данные по взаимосвязи состава микробных сообществ с условиями промерзания и оттаивания отложений могут быть использованы для совершенствования стратиграфических схем четвертичных отложений севера, а также могут быть использованы в рамках практических и теоретических учебных курсов по геокриологии.

Защищаемые положения:

1. Содержание и распределение метана в многолетнемерзлых отложениях Центральной Якутии определяются геокриологическими условиями их формирования:

а) средние значения концентрации метана в позднеплейстоценовом ледовом комплексе террасы левого берега р. Лена значительно различаются от концентрации метана в террасах правого берега р. Лена и террас р. Алдан;

б) различия в концентрации метана в отложениях голоценовых аласов (от практически отсутствия до более чем 20 %) обусловлены стадиями развития аласов и перехода их в субаэральные условия;

в) аллювиальные песчаные отложения долины р. Алдан неоген-среднеплейстоценового возраста, которые подстилают ледовый комплекс, отличаются большой концентрацией метана (до 16,5 %) и характеризуются неравномерным его распределением.

2. Состав углерода метана ледового комплекса Центральной Якутии характеризуется более высокими значениями $\delta^{13}\text{C}$ (от $-49,3\text{‰}$ до $-64,5\text{‰}$), чем ледовый комплекс Северо-Востока ($\delta^{13}\text{C}$ от -64 до -99‰).

3. Сравнение данных по изотопному составу углерода метана и состава сообщества микроорганизмов свидетельствует о:

а) биогенной природе метана в подземном льду обнажения оз. Сырдах и верхнем горизонте ледового комплекса Мамонтовой горы;

б) биогенной природе метана с возможным участием термогенного (угольного) метана во льду нижнего горизонта ледового комплекса Мамонтовой горы;

в) преимущественно термогенном генезисе метана в неоген-среднеплейстоценовых аллювиальных отложениях.

4. Возможность использования данных по структуре сообществ микроорганизмов для изучения условий формирования многолетнемерзлых отложений подтверждается:

а) значительными различиями в составе микроорганизмов между отложениями, отличающимися по возрасту и условиям промерзания;

б) сходной структурой сообществ микроорганизмов подземного льда и вмещающих отложений в мерзлых сингенетических отложениях, и значительными различиями в отложениях эпигенетического типа;

в) соответствием определенных сообществ микроорганизмов горизонтам мерзлых отложений, которые подвергались оттаиванию и последующему промерзанию.

Апробация работы и публикации. Результаты проведенных исследований, основные положения и проблемы, рассматриваемые в диссертации, изложены в 17 публикациях, в том числе 9 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI, РИНЦ. Из них 4 статьи – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Положением МГУ о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по специальности. Результаты работы докладывались на 8 конференциях, в том числе на 5 международных: ЕГУ 2011, GEOQuebec 2015, International Multidisciplinary Forum of Young Scientists and Specialists, Academic Science Week, 2015, XI International Conference on Permafrost 2016, The 2nd International Youth Scientific And Practical Conference “Innovations In Geology, Geophysics And Geography”, 2017, Пятая конференция геокриологов России, 2016.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав с разделами и подразделами, выводов и 4 приложений, изложенных на 182 страницах текста, содержит 60 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 327 наименований, из которых 175 на иностранном языке.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность за возможность выполнения работы, всестороннюю поддержку, вдохновение, ценные советы и замечания своему научному руководителю, д.г.-м.н., профессору Брушкову А.В. Автор выражает признательность в.н.с., к.г.н. Самсоновой В. В. ФГБОУ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН за помощь в проведении полевых работ и поддержку в развитии тематики исследований. Огромная благодарность людям, которые терпеливо и кропотливо обучали практическим и теоретическим методам микробиологи, к.б.н. Филипповой С.Н. Института микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН и к.б.н. Акимову В.Н. Пуцинского государственного естественно-научного института. За помощь в молекулярно-биологических анализах и консультациях по интерпретации результатов автор благодарит сотрудника ФИЦ

Биотехнологии РАН к.б.н. Меркель А. Ю., к. б. н. Булат С. А. НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ. За ценные советы и возможность анализировать образцы газа автор благодарит сотрудника Института Физики Атмосферы РАН к.б.н. Казанцева В.С., а также м.н.с. Кривенок Л.А. за помощь в обработке данных. За проведение изотопного анализа образцов газа – сотрудника Университета Аляски (Фэрбэнкс) Го Ивахана. За проведение изотопных исследований подземных льдов, их интерпретацию, графическую обработку и ценные консультации, автор благодарит профессора, д.г.-м.н. Васильчука Ю.К. и к.г.н. Буданцеву Н.А. Кроме этого, автор благодарит участников полевых работ и последующей обработки данных Шмелева Д.Г., Караевскую Е.С., Котова П.И., Аргунова Р.Н., Тананаева Н.И. Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (гранты РФФИ № 16-05-00296_а, 2015-2018 гг, 16-35-00403 мол_а, 2016-2017гг, 21-55-75004 БФ_Почвы_2021-2022 гг).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** представлены современные сведения об органическом веществе, метане и микроорганизмах в многолетнемерзлых породах (ММП). Проанализированы материалы и работы, посвященные содержанию органического углерода криолитозоны и его связи с климатическими изменениями, газовому составу мерзлых пород, в том числе метану как индикатору условий формирования мерзлых отложений, и микроорганизмам в многолетнемерзлых породах, описаны методики определения состава микробного сообщества, особенности микроорганизмов, продуцирующих и потребляющих метан, и использование метагеномных исследований в качестве перспективного инструмента для понимания биогеохимических процессов в многолетнемерзлых отложениях. Основные выводы приведены ниже:

1. Запасы органического углерода в криолитозоне около 1300 Пг, что составляет примерно 50% запасов всего органического углерода горных пород и выше его содержания в атмосфере. При этом, занимая всего 7% площади, отложения ЛК и аласов содержат не менее 30% запасов углерода.

2. Современное повышение температуры воздуха в Арктике и Субарктике значительно превышает среднемировое, и климатические модели предсказывают её дальнейший рост. Наиболее вероятной причиной потепления считается увеличение содержания в атмосфере парниковых газов, прежде всего диоксида углерода, метана, закиси азота и других, усиливающих парниковый эффект. Поскольку микробные процессы являются ключевыми при разложении органического вещества, то повышение температуры пород приведет, очевидно, к более высокой скорости разложения органического вещества, а благодаря микробной активности новые порции парниковых газов будут поступить в атмосферу.

3. В настоящий момент газовая составляющая является наименее изученной компонентой многолетнемерзлых пород, при этом с каждым годом возрастает практическая и научная значимость ее исследования. Данные по концентрациям газов, содержащимся в мерзлых отложениях и льдах, могут быть использованы для палеогеографических реконструкций. Преобладающий генезис метана в верхних горизонтах многолетнемерзлых пород – биогенный. Метан и микроорганизмы, его продуцирующие, являются индикаторами условий формирования отложений в прошлом.

4. Многолетнемерзлые породы содержат большое количество микроорганизмов (10^5 – 10^8 кл/г), которые представляют собой преимущественно ископаемые, реликтовые организмы, и их возраст в целом соответствует возрасту мерзлых отложений. Использование молекулярно-биологических методов позволяет получить состав практически всего микробного сообщества. На основании современных исследований отложений плейстоцен-голоценового возраста выделяются следующие факторы, влияющие на состав и структуру сообществ микроорганизмов: возраст отложений, содержание льда, генезис отложений. Кроме того, отмечено резкое изменение в составе и структуре сообществ при переходе из плейстоцена в голоцен. Благодаря доступности молекулярно-биологических методов в настоящее время таксономический состав, структура и функции микробных сообществ являются новым и перспективным инструментом для изучения генезиса и условий формирования мерзлых отложений.

Во второй главе представлена характеристика района исследований, включая геоморфологические особенности, геологическое строение и мерзлотные условия.

Территория Центральной Якутии охватывает среднее течение Лены, Лено-Вилуйское и Лено-Алданское междуречье, находящиеся примерно между 60 и 63° с.ш. и 120 и 135° в.д. Мезозойские и палеоген-неогеновые породы в пределах Центральноякутской равнины перекрыты мощной толщей четвертичных отложений, мощность рыхлого чехла увеличивается в северном направлении и достигает в устьях Алдана и Вилуя 60-70 м. Четвертичные отложения распространены почти повсеместно и разнообразны по литологическому составу и мощности. В настоящее время имеется несколько объяснений происхождения осадочных покровов и геоморфологических уровней высоких аккумулятивных равнин территории: эрозионно-аккумулятивная, принятая большинством исследователей, аллювиально-пролювиальная, тектоническая, ледниково-подпрудная. Кроме этого, в последние годы активно развивается гипотеза о формировании мощных толщ криолитогенных четвертичных отложений в результате гляциоизостатического прогибания под влиянием ледниковой нагрузки.

Центральная Якутия расположена в области сплошного распространения ММП. Характерной особенностью является высокая льдистость пород и наличие мощных ПЖЛ

ледового комплекса (ЛК), который занимает около 60 % Центральной Якутии. Мощность ММП изменяется от 100 до 500 м, увеличиваясь с юга на север. Район характеризуется большим количеством термокарстовых озер (аласов), образованных при вытаивании подземного льда. На обширных межаласьях, покрытых лиственничным лесом, среднегодовая температура пород составляет от -2 до -6 °С, в заболоченных долинах рек – от -1 до -4 °С. При этом на безлесных участках в аласных котловинах, а также на сухих дренированных участках, сложенных песчано-галечниковыми грунтами, она не ниже -1 °С.

В третьей главе описана методика и методы полевых и лабораторных исследований, отдельной подглавой выделено обоснование выбора метода дегазации мерзлых образцов, в которой приводится обзор существующих методик дегазации мерзлых пород и сравнение двух чаще всего используемых российскими исследователями методов. Экспедиционные работы в Центральной Якутии проводились в июле-августе в 2011-2012, 2016-2017, и 2021 гг. на 3 природных полигонах Центральной Якутии на террасах правого и левого берегов р. Лена на Лено-Алданском и Лено-Вилуйской междуречьях, главной особенностью которых является распространение ЛК (рис. 1): урочище Нелегер, расположенное на маганской (VI) террасе левого берега р.Лены; оз. Сырдах, приуроченное к тюнгилюнской (V) террасе правого берега р. Лена; урочище Мамонтова гора (V и VI террасы левого берега и пойма правого берега р. Алдан). Также были опробованы отложения I н/п террасы с вложенными в нее высокой и низкой поймой на участке «Якутского разбоя» (подземелье Института Мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск). Для более полной характеристики района в работе также используются данные, предоставленные А.В. Брушковым — для урочища Нелегер и для района аласа Юкэчи, который расположен на абалахской (VI) террасе правого берега р. Лены.

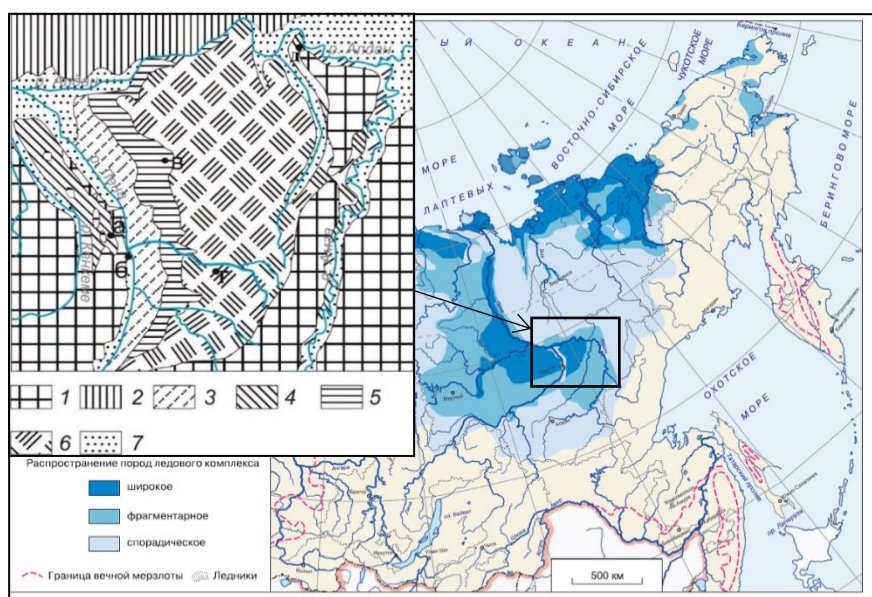


Рис. 1. Распространение отложений ледового комплекса (Конищев, 2011). Врезка-схема расположения исследованных участков (буквами) на разных геоморфологических уровнях (цифры): а – Нелегер; б – Якутск; в – Сырдах; г – Юкэчи, д– Мамонтова гора; 1 – денудационная поверхность, 2 – ледниковая равнина, 3 – бестяхская терраса, 4 –маганская терраса, 5 – тюнгилюнская терраса, 6 –абалахская терраса, 7 – долины рек. Схема составлена автором на основании геоморфологических карт (Иванов, 1984; Соловьев, 1959).

Полевые работы включали в себя отбор образцов мерзлых пород методом колонкового бурения и непосредственно из обнажения для последующего определения основных водно-физических, химических характеристик, микробиологических и молекулярно-биологических исследований, анализа изотопно-кислородного и дейтериевого состава льда, дегазирования мерзлых пород и льда, а также радиоуглеродного датирования.

Лабораторные методы включали: определение состава и свойств исследуемых пород, определение концентрации метана, радиоуглеродное датирование, определение изотопного состава кислорода и водорода льда, определение изотопного состава углерода и водорода метана и углерода углекислого газа; состав микробного сообщества образцов льда и пород определялся с применением молекулярно-биологических методов. Для сравнительного анализа микробных сообществ применялись метрики расхождения Брея-Кертиса и взвешенных расстояний UniFrac.

Сбор газа из монолитов проводился модифицированным методом Б.А. Савельева. Для выбора метода дегазации выполнен обзор существующих методов и экспериментальное сравнение двух методов, распространенных в полевых исследованиях в России – метода «хэдспейс» и модифицированного метода Савельева.

В четвертой главе представлены результаты определения водно-физических, химических свойств, содержания органического углерода пород и подземного льда, анализ стабильных изотопов воды в подземных льдах.

Ледовый комплекс урочища Нелегер отличается от правобережных участков спорадическим распространением и меньшей мощностью подземных льдов, развитых в основном в песчаных и супесчаных отложениях, с глубиной залегания ПЖЛ, не превышающей 5–7 м. Максимальная засоленность приурочена к сезонно-талому слою (СТС) и составляет 0,19-0,22% для аласа и 0,22-0,26% для межаласья, где развит ЛК. Максимальное содержание органического углерода также приурочено к самым верхним горизонтам и составляет для аласа 0,38-0,85%, и 0,29-0,33% для горизонтов над ледяными жилами. Вопреки общепринятому представлению о высоком содержании органического углерода в ЛК, для горизонта ЛК Нелегера оно составляет от 0,35 до 0,41%. Низкие значения характерны и для органического углерода в скважине на аласе (до 0,1%).

Для района оз. Сырдах описано обнажение в термоэрозионном овраге глубиной 6 м, шириной 10 – 15 м. Автором выполнена датировка горизонта, залегающего непосредственно над ЛК, возрастом 10 662 кал.л.н., что согласуется с ранее приведенным в литературе данными о возрасте ЛК 13 700–19 600 л.н., а также возрасте органического вещества из плейстоценовой жилы 21 710 ± 680 лет. Содержание органического углерода колеблется в диапазоне 1,2-2,1 %.

Вмещающие ПЖЛ отложения представлены суглинками влажностью 46–65 %, засоленностью 0,05–0,1%; жильный лед пресный, преимущественно гидрокарбонатно-натриевого состава.

Для района аласа Юкэчи проанализирована имеющаяся современная литература, согласно которой возраст вмещающих жилы отложений составляет 49 232–21 890 кал.л. н, что подтверждает полученные ранее датировки абалахской террасы, 60–24 тыс. л.н. Содержание органического углерода оценивается от 0,1 до 0,5 %.

Наиболее полно изучен район урочища Мамонтова гора левого берега р. Алдан, V и VI террасы, и современная пойма правого берега. В одном из термоцирков в ходе полевых исследований обнаружено и изучено два яруса жил (ранее описаны Кузнецовым, 1976). Они отличаются мощностью, цветом, характером контактов с вмещающими отложениями, представленными пылеватыми суглинками. Содержание органического углерода наиболее высокое из изученных в работе обнажений и составляет 3,7–4,2 % для верхнего горизонта и 2,1–4,2% для нижнего. Высокое содержание углерода отмечено в слое озерных суглинков, подстилающих ЛК, составляя от 3,4 до 4,0%.

Выполнен значительный объем изотопных (рис. 2) и гидрохимических исследований льда, на основании которых можно предположить, что в формировании жил участвовало несколько видов вод.

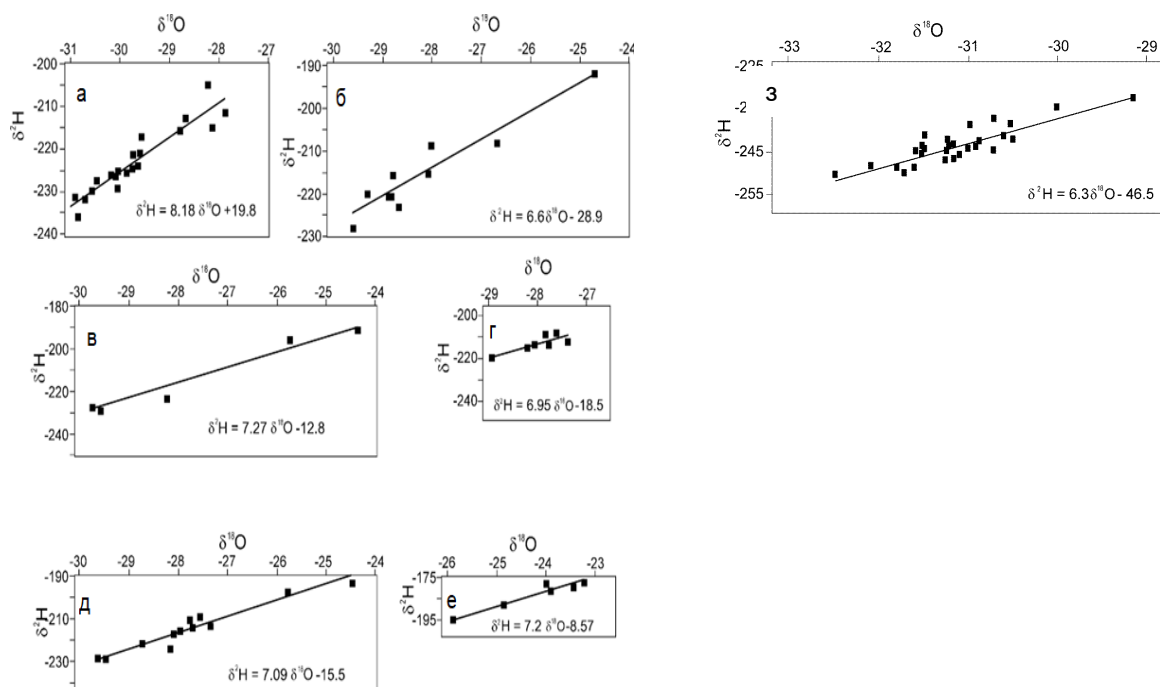


Рис. 2. Соотношение величин $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в ледяных жилах обнажения V террасы правого берега р.Алдан и оз. Сырдах: а, б – подземный лед нижнего яруса Мамонтовой горы (поздний плейстоцен; в, г – верхний ярус спорного возраста (подзеплейстоценовые или голоценовые), д – общий график для в, г; е – голоценовая (современная) ледяная жила на правом берегу р.Алдан, з – подземный лед оз. Сырдах.

При формировании ПЖЛ происходило проникновение в морозобойные трещины минерализованной воды из, по-видимому, небольшого испаряющегося водоема, возможно, озерной или болотной воды, или вод СТС. При этом по изотопному составу нельзя

определенно разделить горизонты двух ярусов жил, тогда как опубликованные результаты для жил других регионов показывают значительные различия в значениях изотопов кислорода и водорода, позволяющих относить их на этом основании к плейстоцену или голоцену. Наблюдаются также значительные их отличия от изотопного состава современного льда поймы. Так как возраст отложений ЛК Мамонтовой горы не вполне ясен, автором была получена абсолютная датировка (43 268 кал.л.н.) оторфованного суглинка, расположенного около головы ледяной жилы верхнего яруса.

Кроме этого, опробованы аллювиальные отложения террасы р. Лена на участке «Якутский разбой», где развита надпойменная терраса, сложенная голоценовыми отложениями, и вложенные в нее высокая и низкая поймы. Образцы представлены мелкозернистыми песками, содержание водорастворимых солей в водных вытяжках грунтов около 400-610 мг/кг, с преобладанием ионов гидрокарбоната и натрия с калием. Содержание органического углерода варьирует в диапазоне 0,5–1,2% для глубин 8 и 12 м.

В пятой главе представлены особенности распределения метана в верхних горизонтах мерзлых пород Центральной Якутии различного возраста и генезиса. В табл.1 представлены полученные результаты, концентрация метана дана в ppmv (в млн⁻¹ по объему газа).

Таблица 1. Результаты статистической обработки результатов по определению содержания метана в мерзлых породах Центральной Якутии.

Точка	Геоморфологический уровень		Отложения, возраст	Количество образцов	Среднее значение, ppmv	Медиана, ppmv	Минимум, ppmv	Максимум, ppmv	Стандартное отклонение
Нелегер	межаласье	водораздел	ПЖЛ (Q _{III})	13	1385,4	1172,9	491,8	3118,1	824,7
			вмещающие суглинки, (Q _{III})	18	1949,3	1498,1	324,8	6145,5	1485,8
			покровный слой, (Q _{IV})	6	1819,4	1449,7	562,4	3951,4	1200,9
		профиль 2	ПЖЛ (?)	5	37,4	34,8	14,9	65,2	19,8
			вмещающие суглинсито-супесчаные отложения, (?)	26	34,9	20,8	3,4	309,9	59,2
		склон	профиль 1	вмещающие суглинки, (Q _{III})	12	477,8	169,9	6,7	2707,4
	профиль 2		вмещающие суглинки, (Q _{III})	5	100,1	100,1	37,9	162,3	71,8
алас	дно аласа 1	профиль 1	суглинки, (Q _{IV})	6	298,0	127,9	29,4	1016,3	407,4

Точка	Геоморфологический уровень		Отложения, возраст	Количество образцов	Среднее значение, ppmv	Медиана, ppmv	Минимум, ppmv	Максимум, ppmv	Стандартное отклонение
	днище аласа 2	профиль 2	суглинки, (Q _{IV})	5	616,4	754,0	162,3	841,8	285,8
Юкэчи	межаласые	водораздел	жильный лед, (Q _{III})	23	203,3	38,7	8,6	1576,4	331,7
			вмещающие суглинки, (Q _{III})	7	82,8	45,3	3,1	275,9	96,8
			покровный слой, (Q _{IV})	7	2914,0	642,3	88,3	10067,7	3899,1
	склон		жильный лед, (Q _{III})	11	73,7	32,8	4,5	318,8	99,2
			вмещающие суглинки, (Q _{III})	10	177,7	80,9	17,2	493,8	187,1
	алас	Днище аласа	2	суглинки, (Q _{IV})	7	90,1	17,2	56,5	331,6
1			суглинки, (Q _{IV})	5	170855,4	167931,5	115975,4	234346,0	46591,3
Сырдах	межаласые	водораздел	жильный лед, (Q _{III})	5	26,4	16,2	12,6	49,0	17,4
Долина р.Лены	I терраса		аллювиальный песок (Q _{IV})	3	5800,7	6813,0	1671,0	8918,0	3728,1
	пойма			4	312,6	369,0	73,8	438,0	163,8
Урочище Мамонтова гора	V терраса р.Алдан		покровный слой, (Q _{IV})	4	5325,0	5369,4	5140,8	5420,1	126,2
			жильный лед, (Q _{III?,IV})	5	80,4	68,0	50,0	128,0	25,0
			вмещающие суглинки, (Q _{III?,IV})	5	274,0	273,9	146,0	360,0	70,0
			жильный лед, (Q _{III})	27	117,6	60,6	11,1	608,7	143,0
			вмещающие суглинки, (Q _{III})	12	78,8	78,7	35,0	141,0	30,7
			аллювиальный песок (Q _{II})	4	72863,8	77298,7	4733,5	164778,4	60971,7
			аллювиальный песок (N)	4	39,6	38,0	8,1	74,3	33,2
	VI терраса р.Алдан		аллювиальный песок (N)	5	1676,4	1565,6	70,0	6400,0	1883,1
	пойма		жильный лед, (Q _{IV})	3	676,1	677,6	650,4	700,2	24,9

Результаты определения изотопного состава $\delta^{13}\text{C}$ (CH_4), $\delta^2\text{H}$ (CH_4), $\delta^{13}\text{C}$ (CO_2) ‰ в образцах подземного льда двух ярусов ЛК и современной поймы урочища Мамонтова гора, а также подземного льда обнажения оз. Сырдах приведены на рис. 3.

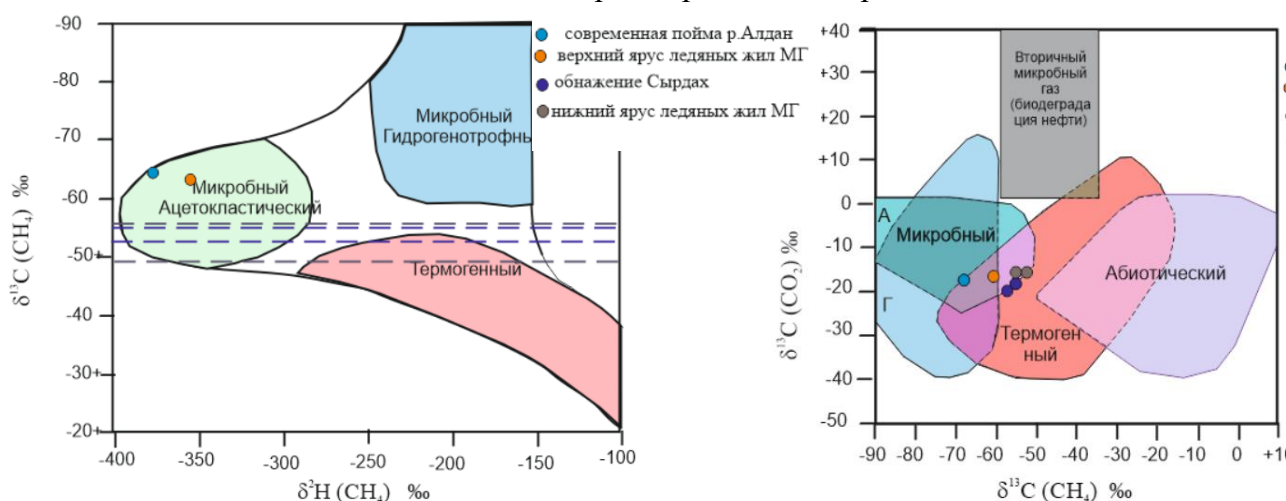


Рис. 3. Слева – значения изотопного состава метана (точками отмечены данные для образцов, где определены $\delta^{13}\text{C}$ (CH_4) и $\delta^2\text{H}$ (CH_4), пунктирными линиями – для образцов, где определен только $\delta^{13}\text{C}$ (CH_4)) в газовой фазе подземных льдов урочища Мамонтова гора и оз. Сырдах на классической $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{12}\text{H}$ диаграмме (Whiticar, 1999); справа – генетическая диаграмма для метана, основанная на сопоставлении стабильных изотопов $\delta^{13}\text{C}$ (CH_4), $\delta^{13}\text{C}$ (CO_2) для подземных льдов урочища Мамонтова гора и оз. Сырдах (Milkov, Etiore, 2018).

Для уточнения генезиса собраны опубликованные материалы по значениям $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$, $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$, $\delta^{13}\text{C}$ для различных районов Якутии (рис. 4).

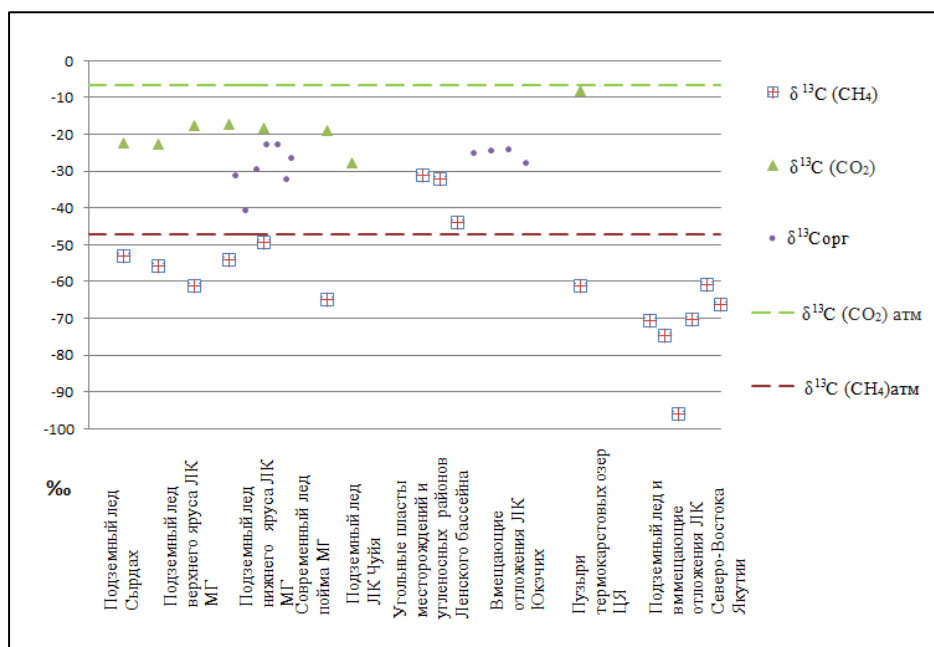


Рис. 4. Данные по $\delta^{13}\text{C}$ для различных районов Якутии. Значения в подземном льду обнажений оз. Сырдах и р.Алдан (Мамонтова гора) являются результатами, полученными автором, остальное — угольные пласты месторождений и угленосных районов Центральной Якутии из (Подольян и др., 1999), вмещающие отложения ЛК Юкэчи из (Windirsch et al., 2020), пузыри тремокарстовых озер Центральной Якутии (Brosius et al., 2012), $\delta^{13}\text{C}$ органического материала Мамонтовой горы из (Васильчук, 2006), для Северо-Востока Якутии из (Краев, 2010). Данные по атмосферному $\delta^{13}\text{C}$ (CO_2) из (Leuenberger и др., 1992). Данные по атмосферному $\delta^{13}\text{C}$ (CH_4) из (Quay et al., 1999).

На основании анализа полученных результатов сделаны следующие выводы:

1. Распределение метана в мерзлых породах и льдах отличается значительной изменчивостью по глубине и простиранию как между различными горизонтами, так и в пределах одного горизонта, причем диапазон значений возрастает с увеличением средней концентрации. Диапазон изменений концентрации метана в верхних горизонтах отложений ММП Центральной Якутии от 0 до 23,4 %, содержание зависит от типа отложений и условий их промерзания-оттаивания.
2. Для отложений позднеплейстоценового ЛК правого (тунгюлюнская (V) и абалахская (VI) террасы, V терраса р.Алдан) и левого (маганская (VI) терраса) берегов Лены установлены значительные различия в содержании метана. При этом в ЛК Юкэчи и ур. Нелегер, которые отличаются развитием ПЖЛ в пылеватых песчаных-супесчаных отложениях и низким содержанием органического углерода, также встречаются единичные высокие значения концентрации метана в поровом воздухе.
3. Для перекрывающих ЛК отложений (промежуточный слой) характерны высокие значения концентрации метана – до 0,4% для Нелегера, 0,5 % для Мамонтовой горы, и до 1% для Юкэчи. Такие результаты не противоречат имеющимся сведениям о том, что для ЛК Северо-Востока Якутии максимальные значения концентрации метана также приурочены к перекрывающему слою.
4. Подстилающие ЛК аллювиальные песчаные отложения Мамонтовой горы неоген-среднеплейстоценового возраста содержат значительно большие количества метана и характеризуются неравномерным распределением газа по глубине, при этом концентрация метана в поровом воздухе составляет от долей процента до 16,5 %. Максимальные значения концентрации приурочены к синкриогенным пескам среднего плейстоцена, вопреки существующей гипотезе в литературе о том, что сингенетическое промерзание не способствует накоплению метана.
5. Максимальная концентрация метана зафиксирована в отложениях аласа Юкэчи абалахской (VI) террасы, составляя от 11,5 до 23,4 %, тогда как для аласных отложений маганской (VI) террасы наблюдаются значительные различия — в одном аласе значения достигают 4,8 %, но приурочены только к верхним 2,5 м, тогда как в другом составляют доли процента до глубины 5,0 м, соответствующей нижней границе ЛК, по которому он сформировался. Такие различия связаны с разными стадиями, на которых произошло промерзание аласов. Оттаивание льдистых мерзлых пород ЛК и образование термокарстовых озер - благоприятные факторы для процессов метаногенеза и накопления метана в отложениях. Если промерзание аласа начало происходить в его активной стадии, на стадии обводненности, высокая концентрация метана в отложениях сохраняется. Таким образом, по глубине, до которой распространены высокие концентрации, можно судить о максимальной

мощности протаивания аласа. При спуске озера и переходе аласа в субэральные условия возможна эмиссия накопившегося метана из отложений перед их промерзанием.

6. На основании определения изотопного состава углерода в метане и углекислом газе, стабильного изотопа водорода в метане выявлена региональная особенность генезиса метана – более тяжелый изотопный состав углерода метана для ЛК Центральной Якутии (значения $\delta^{13}\text{C}$ (CH_4) составляют от $-49,3\text{‰}$ для ЛК до $-64,5\text{‰}$) в сравнении с ЛК Северо-Востока. Это связано, вероятно, со смешением метана из угольных пластов неогеновых или меловых отложений, проникавшим через мерзлую толщу, с биогенным метаном, который продуцировался одновременно с формированием отложений.

В **шестой главе** исследуется связь состава микробных сообществ и условий накопления и промерзания изучаемых отложений, приводятся результаты определения состава прокариотного сообщества обнажений Мамонтова гора и оз. Сырдах, показано применение полученных данных для уточнения генезиса метана.

Были отобраны образцы из основных горизонтов V и VI террас урочища Мамонтова гора (13 шт, номера образцов МГ1–МГ12), а также из видимой части обнажения оз. Сырдах (3 шт, номера С13–С15). В табл. 2 приводится описание типа и возраста отложений с соответствующим типом промерзания.

Микробные сообщества исследуемых образцов, в основном, представлены бактериями. Археи обнаружены в минорных количествах и составляют для Мамонтовой горы в сообществах ПЖЛ (верхний ярус) от 0,2 до 0,6%, во вмещающих отложениях верхнего яруса – 0,6 %, во вмещающих отложениях нижнего яруса – от 0,01 до 0,04 %, СТС содержит около 0,1 % архей от суммарного количества идентифицированных микроорганизмов. В образцах песка (средний плейстоцен – неоген), подстилающих отложения ЛК, во всех 6 исследованных образцах обеих террас архей не обнаружено. Во льду оз. Сырдах выявлено 0,1%, в перекрывающих ПЖЛ суглинках от 0,01 до 0,25 % архей. Образцы различаются как по составу основных групп микроорганизмов, так и по их соотношению, преобладают последовательности генов 16S рНК представителей следующих бактериальных типов: *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Firmicutes*, *Gemmatimonadetes*, *Proteobacteria*, *Parcubacteria*, *Verrucomicrobia* (рис. 5).

Таблица 2. Список отобранных образцов для микробиологического анализа обнажений Мамонтовой горы и оз.Сырдах.

Номер образца	Точка отбора	Тип отложений	Возраст накопления отложений	Возраст начала непрерывного промерзания отложений	Тип промерзания
МГ3	Мамонтова гора, 80-метровая терраса (VI)	песок	Миоцен	Средний плейстоцен	эпикриогенное
МГ4	Мамонтова гора, 50 -метровая терраса (V), нижний ярус ЛК	Суглинок (вмещающий ледяные жилы)	Поздний плейстоцен	Поздний плейстоцен	синкриогенное
МГ5	Мамонтова гора, 50-м терраса	песок	Миоцен	Средний плейстоцен	эпикриогенное
МГ6	Мамонтова гора, 80-метровая терраса (VI)	песок	Миоцен	Средний плейстоцен	эпикриогенное
МГ7	Мамонтова гора, 50 -метровая терраса (V)	песок	Средний плейстоцен	Средний плейстоцен	синкриогенное
МГ8	Мамонтова гора, 50 -метровая терраса (V)	песок	Средний плейстоцен	Средний плейстоцен	синкриогенное
МГ9	Мамонтова гора, 50 -метровая терраса (V), верхний ярус ЛК	Суглинок (вмещающий ледяные жилы)	? Поздний плейстоцен, голоцен	? Поздний плейстоцен, голоцен	?
МГ10	Мамонтова гора, 50-метровая терраса (V), верхний ярус ЛК	лед	? Поздний плейстоцен, голоцен	? Поздний плейстоцен, голоцен	?
МГ11	Мамонтова гора, 50 -метровая терраса (V), нижний ярус ЛК	Суглинок (вмещающий ледяные жилы)	Поздний плейстоцен	Поздний плейстоцен	синкриогенное
С13	Оз.Сырдах, ЛК	Суглинок (покровный)	голоцен	голоцен	эпикриогенное
С14	Оз.Сырдах, ЛК	Суглинок (покровный)	голоцен	голоцен	эпикриогенное
С15	Оз.Сырдах, ЛК	лед	Поздний плейстоцен	Поздний плейстоцен	синкриогенное
МГ1	Мамонтова гора, 50-метровая терраса (V), верхний ярус ЛК	лед	? Поздний плейстоцен, голоцен	? Поздний плейстоцен, голоцен	?
МГ2	Мамонтова гора, 50-метровая терраса (V), нижний ярус ЛК	лед	Поздний плейстоцен	Поздний плейстоцен	синкриогенное
МГ12	Мамонтова гора, 50-метровая терраса (V), СТС	суглинок	голоцен	голоцен	—

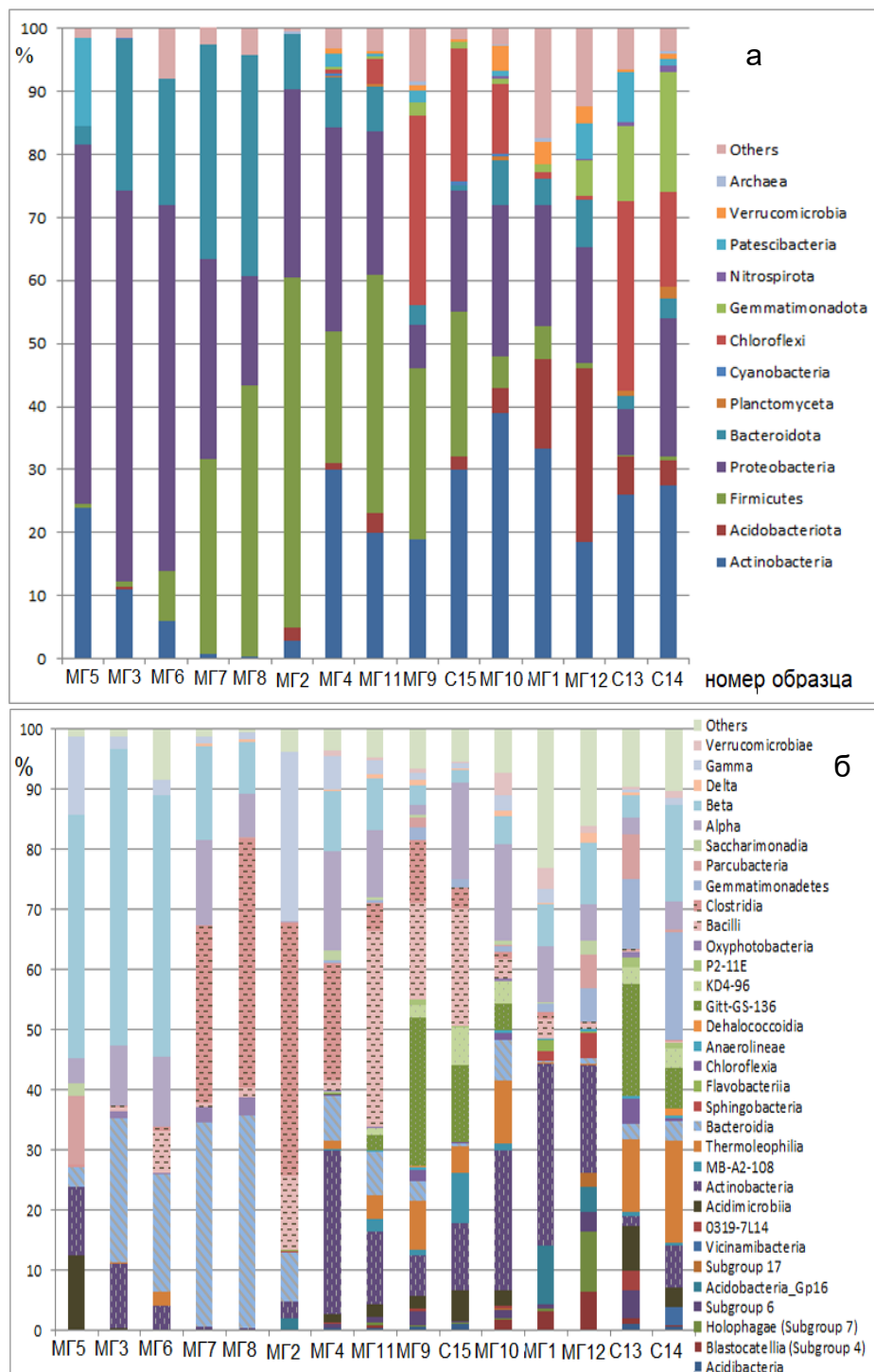


Рис. 5. Состав микробных сообществ на уровне филумов (а) и классов (б) в отложениях обнажений Мамонтова гора и оз. Сырдах, обозначения образцов в табл.1.

Микробные сообщества исследованных горизонтов отличаются как по составу доминантных групп, так и их соотношению. Было проведено сравнение состава профилей микробных сообществ образцов с использованием метрики Брея-Кертиса и филогенетической метрики взвешенных расстояний UniFrac, учитывающей степень родства таксонов. Для отображения последнего применялся метод «Анализа главных координат». Результаты в графическом виде представлены на рис. 6 и рис. 7.

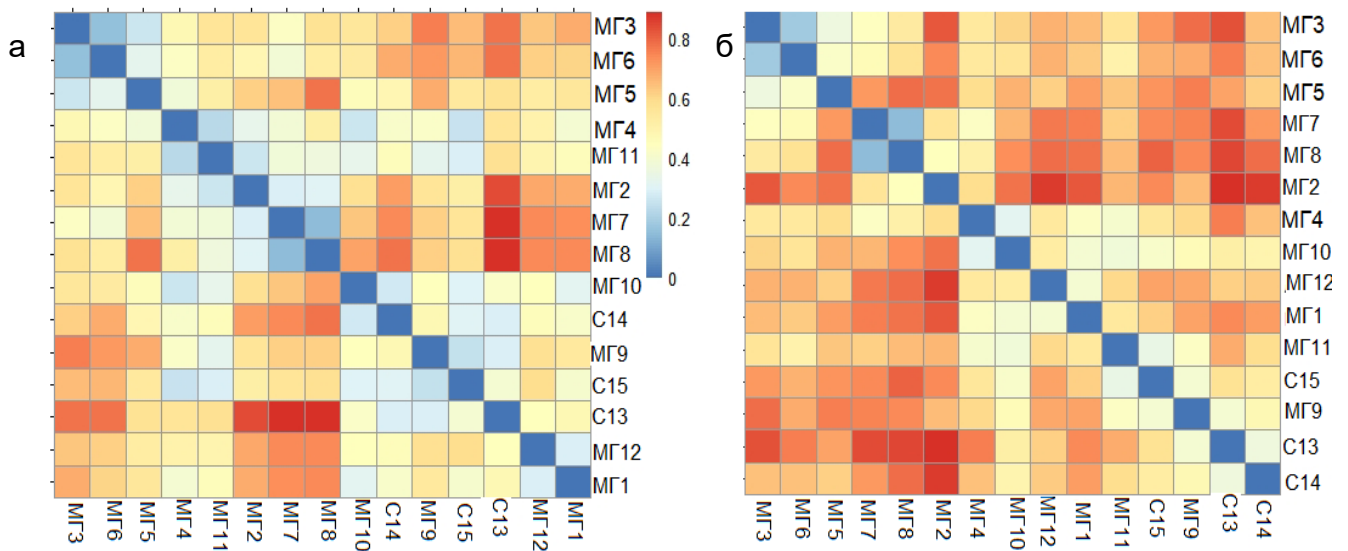


Рис. 6. «Тепловая» карта («хитмап») метрики несходства Брея — Кертиса для филумов (а) и классов (б).

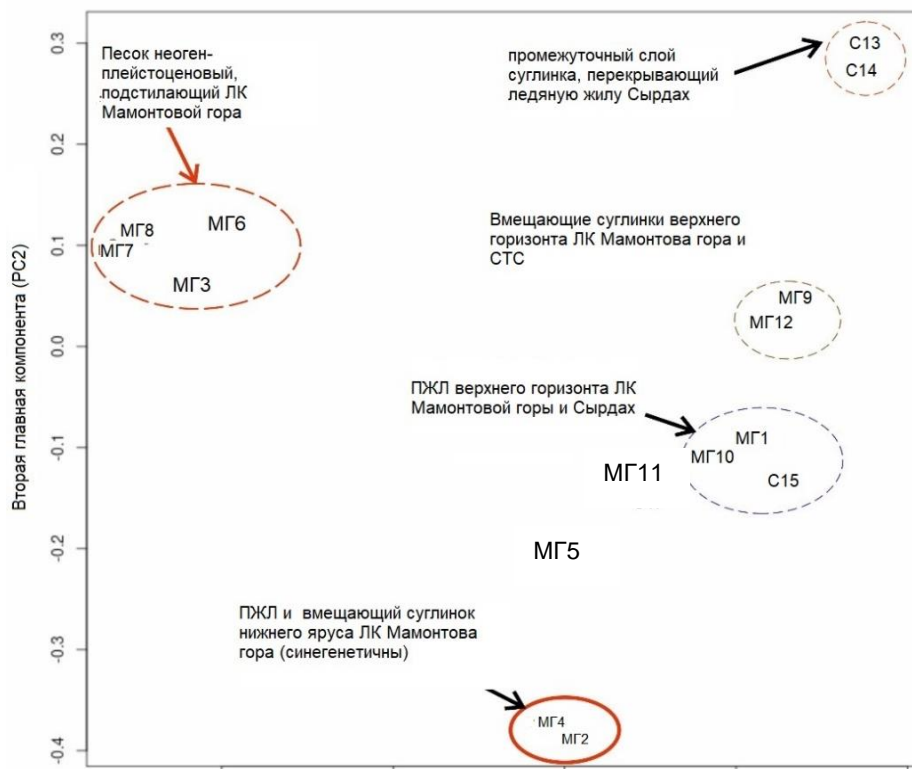


Рис. 7. Анализ бета-разнообразия методом основных координат (PCoA) на основе взвешенных расстояний UniFrac (метрика «weighted UniFrac»). Образы «МГ»- Мамонтова гора, «С»-Сырдах.

На основании анализа состава микробных сообществ и сходства между образцами сделаны следующие выводы:

1. Установлены высокие коэффициенты сходства сообществ в ПЖЛ и вмещающих отложениях нижнего яруса ЛК урочища Мамонтова гора (несходство Брея Кертиса 0,26 на уровне филумов), тогда как для вмещающих отложений и ПЖЛ верхнего яруса коэффициент составляет 0,45. Это подтверждается близким расположением образцов льда и суглинка

нижнего яруса и дистанцированным расположением суглинка и льда верхнего яруса при анализе бета-разнообразия методом основных координат (PCoA) на основе взвешенных расстояний UniFrac, учитывающим близость расположения сообществ на филогенетическом дереве (рис.7).

2. Выявлены значительные различия в составе микробных сообществ подземного льда нижнего и верхнего яруса Мамонтовой горы. Группа образцов жил верхнего яруса Мамонтовой горы ПЖЛ обнажения Сырдах кластеризуются вместе на основании метрики взвешенных расстояний UniFrac, на значительном удалении от льда нижнего яруса Мамонтовой горы, достигая значений несходства 0,52–0,68 на уровне филумов. Для подземного льда нижнего яруса выявлено значительное снижение уровня разнообразия бактерий. На долю двух филумов приходится большая часть сообщества – *Firmicutes* (54,5%) и *Proteobacteria* (31,4%). Основные отличия на уровне филумов между кластерами образцов льда связаны с появлением в образцах льда верхнего яруса подземного льда Сырдах значительной доли (11–21%) представителей класса грамтрицательных бактерий *Chloroflexia*, что может быть связано с образованием исследуемого льда из фотосинтетически-активной водной экосистемы, при этом преобладают типы *Gitt-GS-136*, *KD4-96*, которые, по имеющимся литературным данным, характерны для верхнего почвенного слоя, речных осадков, пресноводных озер, и широко распространены в таберальных отложениях, в том числе недавно протаявших.

3. Выявлено, что более легкому по содержанию изотопов жильному льду нижнего слоя ЛК урочища Мамонтовой горы (МГ), который наиболее вероятно формировался из снежных вод, соответствует бедное, малоразнообразное микробное сообщество, здесь полностью отсутствуют микроорганизмы филума *Chloroflexia*. В ледяной жиле обнажения оз. Сырдах источник воды в жиле другой – вода, подвергшаяся значительному фракционированию за счет испарения (то есть поверхностная вода), здесь наблюдается максимальное количество (21%) бактерий *Chloroflexia*, представленное теми же классами. Для подземного льда верхнего яруса Мамонтовой горы доля сообщества *Chloroflexia* составляет промежуточные 11 %, при этом, согласно полученным изотопным данным по льду, происхождение воды соответствует атмосферному происхождению льда с незначительным участием вод неатмосферного происхождения. Во льду оказались образцы с более тяжелым изотопным составом, что указывает на участие в формировании жил испарившихся озерно-болотных (аласных) вод.

4. Для пород, вмещающих, подстилающих и перекрывающих ПЖЛ, обилие некультивируемых *Chloroflexi* классов *Gitt-GS-136* и *KD4-96* характерно только для горизонтов, которые подверглись протаиванию и последующему промерзанию. Бактерии этих классов, как правило, встречаются в верхнем почвенном слое, речных осадках, пресноводных озерах, а также широко распространены в таберальных отложениях, в том числе недавно

протаявших, а в исследованных отложениях составляют до 30 % микробного сообщества в отложениях верхнего яруса вмещающих ЛК суглинков МГ, вероятно, протаявших в каргинское время, а также в покровном слое обнажения оз. Сырдах, протаявшем в голоцене.

В отдельной подглаве исследуется связь генезиса метана с распространением метаногенных и метанотрофных микроорганизмов в образцах обнажений Мамонтовой горы и оз. Сырдах. Количество идентифицированных членений метаногенных архей составляют от 0,01 до 0,3%, а метанотрофных микроорганизмов — от 0,03 до 1,7% от общего количества. Максимальные значения (и максимальная вариабельность метанотрофов) приурочены к наиболее древним неогеновым отложениям Мамонтовой горы, где не было идентифицировано метаногенов, но выявлен большой разброс значений концентрации метана. Анализ концентрации метана, изотопной подписи метана совместно с анализом содержания изотопов углерода в углекислом газе и данными молекулярно-биологических исследований позволяет с высокой достоверностью утверждать наличие метана *биогенного* происхождения в верхнем ярусе ЛК Мамонтовой горы с ведущей ролью ацетокластического метаногенеза, и наличие метана смешанного генезиса, *биогенного и термогенного (угольного)*, с ведущей ролью биогенного как ацетокластического, так и гидрогенотрофного метаногенеза для нижнего горизонта ЛК Мамонтовой горы. Аномально высокие значения концентрации метана при отсутствии следов метаногенных архей, но наличии метанотрофных бактерий в отдельных образцах до 1,7 % позволяют предполагать для неоген-плейстоценовых аллювиальных отложений Мамонтовой горы ведущую роль *термогенного генезиса метана*. Для подземного льда ЛК оз. Сырдах предполагается *биогенный генезис метана*, с преобладанием *ацетокластического пути*.

Основные выводы работы:

1. Выполнено комплексное исследование мерзлых отложений в обнажениях и скважинах в урочищах Мамонтова гора, Сырдах, Нелегер, Юкэчи, а также пойменных отложений левого берега р. Лена, которое включало в себя отбор образцов пород и льда для определения свойств, газового состава, стабильных изотопов воды, молекулярно-биологического анализа.
2. Выявлены особенности распределения метана в верхних горизонтах мерзлых отложений Центральной Якутии:
 - а) установлены различия в концентрации метана отложений ЛК террас левого (маганская терраса) и правого (тюнгилюнская и абалахская (террасы) берегов Лены, а также V террасы р. Алдан;
 - б) выявлены значительные различия в концентрации метана в отложениях аласов — от практического отсутствия до первых десятков процентов, обнаружено отсутствие корреляции между содержанием метана в отложениях ЛК и его содержанием в сформировавшемся аласе;

наличие или отсутствие метана в отложениях аласа связано со стадией развития аласа, на которой происходило его промерзание, скоростью спуска озера и перехода аласа в субаэральные условия;

в) подстилающие ЛК аллювиальные песчаные отложения неоген-плейстоценового возраста (урочище Мамонтова гора) содержат значительно большие количества метана, чем ЛК, и характеризуются неравномерным распределением газа в отложениях, от долей процента до 16,5 %, что необходимо учитывать при оценке эмиссии метана для размываемых речных берегов;

г) выявлен более тяжелый изотопный состав углерода метана для ЛК Центральной Якутии, чем для ЛК Северо-Востока, что связано, вероятно, со смешением угольного метана из угольных пластов неогеновых или меловых отложений, проникавшим через мерзлую толщу, с биогенным метаном, который продуцировался одновременно с формированием отложений.

3. Установлена принципиальная возможность использования данных о составе и структуре сообществ микроорганизмов для изучения генезиса, истории формирования и промерзания отложений. Для ЛК Центральной Якутии, подстилающих и перекрывающих его отложений выявлено:

а) сравнение состава микробного сообщества позволяет выделять отложения, различные по возрасту и условиям промерзания;

б) сходный состав сообщества микроорганизмов для подземного льда и вмещающих отложений свидетельствует об их сингенетическом происхождении, значительные различия отмечены при их эпигенетическом генезисе;

в) использование совместного анализа изотопно-гидрохимического состава подземного льда и микробных сообществ позволило установить соответствие между происхождением воды и составом сообщества, выявить определенные сообщества микроорганизмов, характерные для горизонтов мерзлых отложений, которые подвергались оттаиванию и последующему промерзанию.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности

1. **Cherbunina, M. Y.**, Karaevskaya, E. S., Vasil'chuk, Y. K., Tananaev, N. I., Shmelev, D. G., Budantseva, N. A., Merkel, A. Y., Rakitin, A. L., Mardanov, A. V., Brouchkov, A. V., Bulat, S. A. Microbial and geochemical evidence of permafrost formation at Mamontova Gora and Syrdakh, Central Yakutia // *Frontiers In Earth Science*. — 2021. — Vol. 9. — P. 739365. Импакт-фактор в WoS (2021): 3,498. Объем публикации 1,95 п.л., объем вклада соискателя 1,5 п.л.

2. Васильчук, Ю. К., Шмелев, Д. Г., **Чербунина, М. Ю.**, Буданцева, Н. А., Брушков, А. В., Васильчук, А. К. Новые изотопно-кислородные диаграммы позднеплейстоценовых и голоценовых повторно-жильных льдов Мамонтовой Горы и Сырдаха, Центральная Якутия // *Доклады Академии наук*. — 2019. — Т. 486. — № 3. — С. 365–370. Импакт-фактор в РИНЦ

(2019): 0,784. Объем публикации 0,55 п.л., объем вклада соискателя 0,45 п.л.

3. **Чербунина, М. Ю.**, Шмелев, Д. Г., Брушков, А. В., Казанцев, В. С., Аргунов, Р. Н. Закономерности распределения метана в верхних горизонтах многолетнемерзлых пород Центральной Якутии. // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2017. — № 6. — С. 105–112. Импакт-фактор в РИНЦ (2017): 0,537. Объем публикации 0,70 п.л., объем вклада соискателя 0,45 п.л.

4. **Чербунина, М. Ю.**, Шмелев Д. Г., Кривенко Л. А. Влияние способов дегазации мерзлых образцов на результаты определения концентрации метана // Инженерная геология. — 2018. — Т. 13, № 3. — С. 62–73. Импакт-фактор в РИНЦ (2018): 0,332. Объем публикации 2,1 п.л., объем вклада соискателя 1,6 п.л.

Статьи в иных рецензируемых научных изданиях

1. Rakitin, A., Beletsky, A., Mardanov, A., Surgucheva, N., Sorokin, V., **Cherbunina, M.**, Brouchkov, A., Mulyukin, A., and Filippova, S. Prokaryotic community in Pleistocene ice wedges of Mammoth Mountain // *Extremophiles*. — 2020. — № 24. — P. 93–105. Импакт-фактор в WoS (2021): 2,39. Объем публикации 1,3 п.л., объем вклада соискателя 0,3 п.л.

2. Филиппова, С. Н., Сургучева, Н. А., Колганова, Т. В., **Чербунина, М. Ю.**, Брушков, А. В., Мулюкин, А. Л., Гальченко, В. Ф. Выделение и идентификация бактерий из образцов жильного льда ледового комплекса Мамонтовой горы (Центральная Якутия) // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. — 2019. — № 3. — С. 246–254. Импакт-фактор в РИНЦ (2019): 0,933. Объем публикации 0,9 п.л., объем вклада соискателя 0,2 п.л.

3. Иванова, Т. И., Кузьмина, Н. П., **Чербунина, М. Ю.** Микробное сообщество активного слоя почвы из обнажения Мамонтовой горы // Вестник Северо-Восточного научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук. — 2017. — № 4. — С. 95–101. Импакт-фактор в РИНЦ (2017): 0,277. Объем публикации 0,8 п.л., объем вклада соискателя 0,3 п.л.

4. Филиппова, С. Н., Сургучева, Н. А., Сорокин, В. В., **Чербунина, М. Ю.**, Карнышева, Э. А., Брушков, А. В., Гальченко, В. Ф. Разнообразие бактериальных форм в образцах повторно-жильного льда ледового комплекса Мамонтовой горы (Центральная Якутия) // Микробиология. — 2014. — Т. 83. — № 2. — С. 225–225. Импакт-фактор в РИНЦ (2014): 1,067. Объем публикации 1,2 п.л., объем вклада соискателя 0,4 п.л.

5. Васильчук, Ю. К., Шмелев, Д. Г., Буданцева, Н. А., **Чербунина, М. Ю.**, Брушков, А. В., Васильчук, А. К., Чижова, Ю. Н. Изотопно-кислородный и дейтериевый состав сингенетических повторно-жильных льдов разрезов Мамонтова Гора и Сырдах и реконструкция позднеплейстоценовых зимних температур Центральной Якутии // Арктика и Антарктика. — 2017. — № 2. — С. 112–135. Импакт-фактор в РИНЦ (2018): 0,444. Объем публикации 2,3 п.л., объем вклада соискателя 0,3 п.л.