

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

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

Газонасыщенные мёрзлые породы, как объект изучения геокриологии

Хименков Александр Николаевич

кандидат геолого-минералогических наук

ведущий научный сотрудник, Институт геозологии РАН

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

✉ a_khimenkov@mail.ru



Кошурников Андрей Викторович

кандидат геолого-минералогических наук

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

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

✉ msu-geophysics@mail.ru



Дернова Елена Олеговна

Научный сотрудник, Институт геозологии РАН

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

✉ dernova.eo@gmail.com



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

DOI:

10.7256/2453-8922.2023.1.40378

EDN:

PLNGUD

Дата направления статьи в редакцию:

05-04-2023

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

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

Ключевые слова:

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

Введение

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

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

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

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

Источники поступления газа и причины формирования газонасыщенных зон

Биохимические процессы в осадках

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

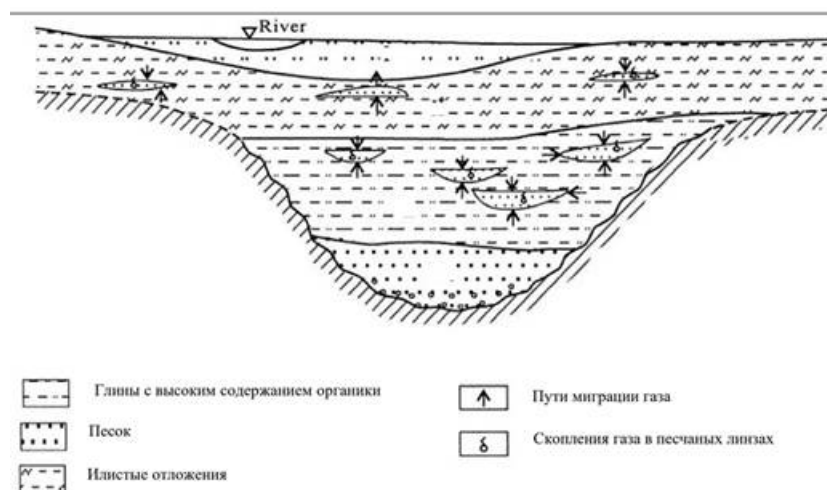


Рис. 1. Схематический разрез погребенной палеодолины с включение локальных скоплений газа в песчаных линзах [\[23\]](#).

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

Поступление газа по тектоническим нарушениям

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

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

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

Криогенный фактор концентрации внутригрунтового газа

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

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

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

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

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

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

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

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

Распространение газонасыщенных пород в криолитозоне

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

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

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

Примечание. * В скобках количество образцов.

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

Таблица 1. Концентрация метана (ppmV) в подземных льдах

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

Примечание. * В скобках количество образцов.

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

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

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

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

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

Газонасыщенные мёрзлые породы в пределах нефтегазовых месторождений

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

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

В этом случае газонасыщение обуславливается совместным действием нескольких факторов:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Формы нахождения газовых включений в талых и мёрзлых грунтах

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

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

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

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

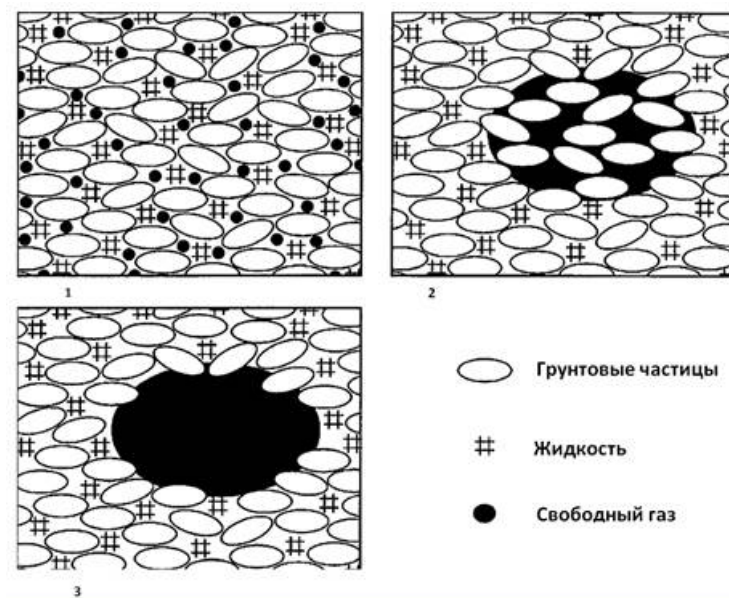


Рис. 2. Три различных типа газовых пузырьков в осадке: Тип 1 – интерстициальные пузырьки; 2–резервуарные пузырьки; пузырьки, вытесняющие осадок, 3 – газовые пустоты. [44]

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

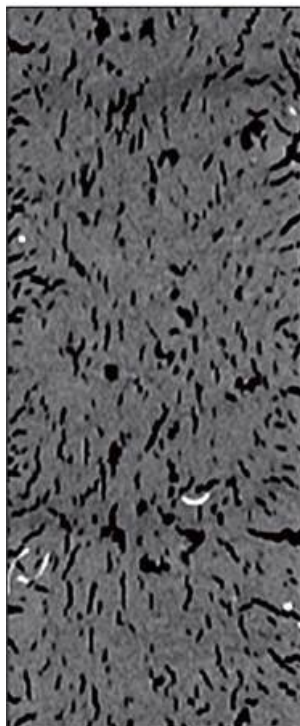


Рис. 3. Фрагмент рентгеноплоскостного среза. Серое — осадок, чёрное — трещины, обусловленные дегазацией осадка (глубина 100–120 см) [\[45\]](#)

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

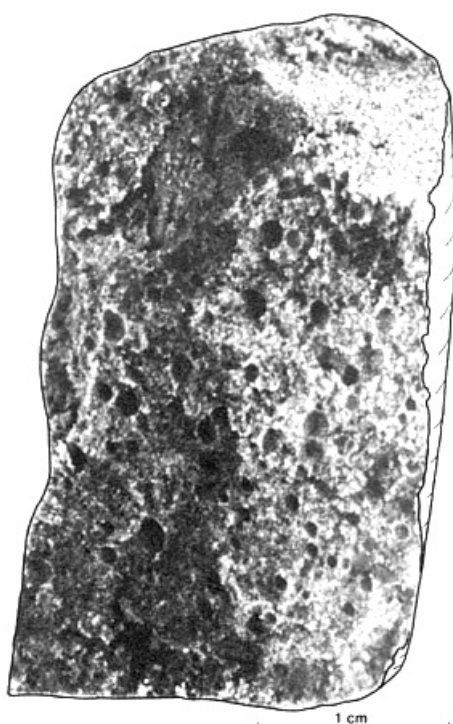


Рис. 4. Образец керна, слабо илистого песка формации Абердин Граунд, отобранного с глубины 59 м ниже морского дна, на котором видны газовые пустоты. Скважина пробурена в районе Южного Фладена, Северное море [\[46\]](#).

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

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

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

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



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

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



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

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



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

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



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



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

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



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

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

Давление газа в мёрзлых грунтовых массивах

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

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

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

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

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

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

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

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

Изучение процессов перераспределения газа в грунтовом массиве в лабораторных условиях

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

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

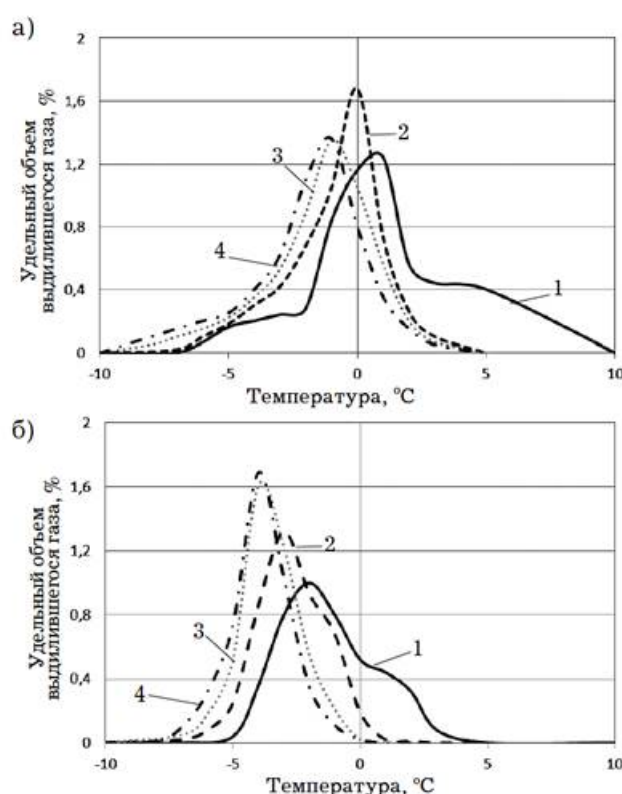


Рис. 11. Зависимость объема газа, выделившегося под действием сжимающих нагрузок (1 - 0,001 МПа, 2 - 0,05 МПа, 3 - 0,1 МПа, 4 - 0,2 МПа) от температуры: а) пылеватый песок; б) суглинок [3].

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

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

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

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

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

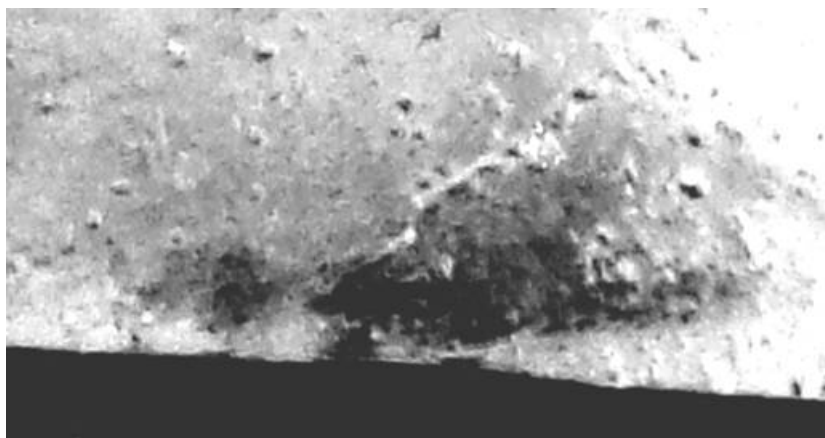


Рис.12 . Нижняя часть образца примыкающая к штуцеру, подводящему газ. Съёмка в отражённом свете. Фото А.Н. Хименкова [5]

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

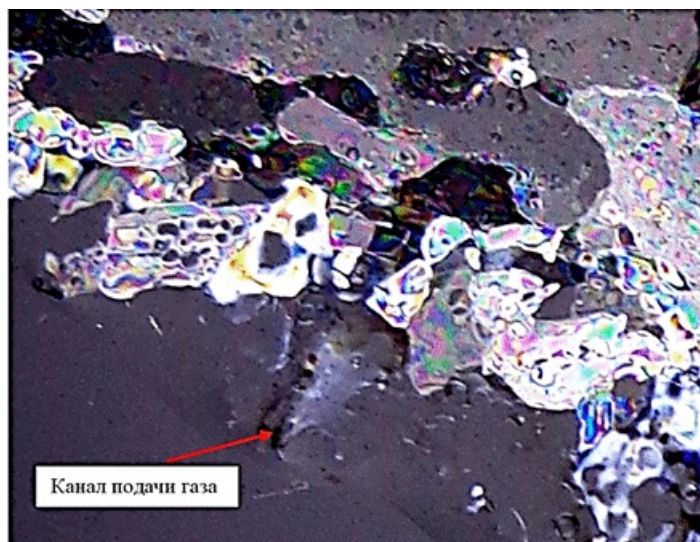


Рис. 13. Структура льда зоны льда, непосредственно примыкающего к штуцеру подачи газа. Съёмка в поляризованном свете. Фото А.Н. Хименкова [\[5\]](#)

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

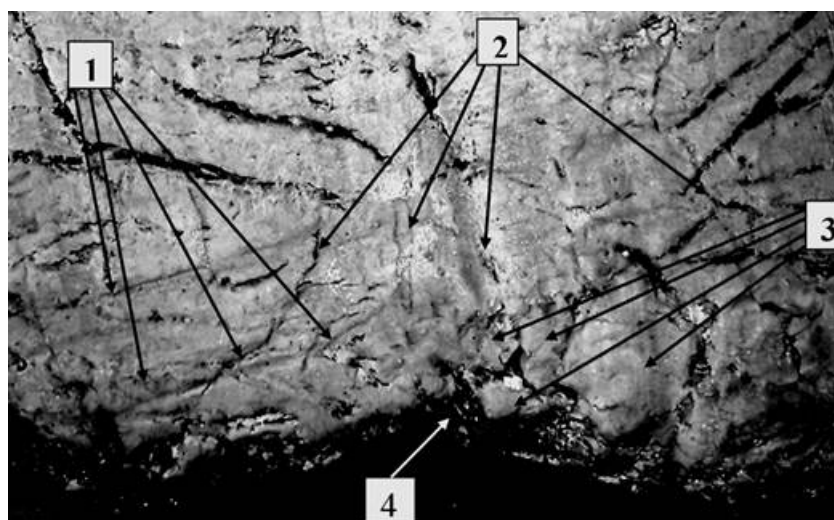


Рис. 14. Нижняя часть газонасыщенного образца. Деформационные образования грунта вблизи штуцера подачи газа: 1 - пластические деформации, 2- трещины, 3-грунтовые блоки, разделённые трещинами, 4-место контакта канала подачи газа с грунтом. Фото

А.Н. Хименкова [\[5\]](#)

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

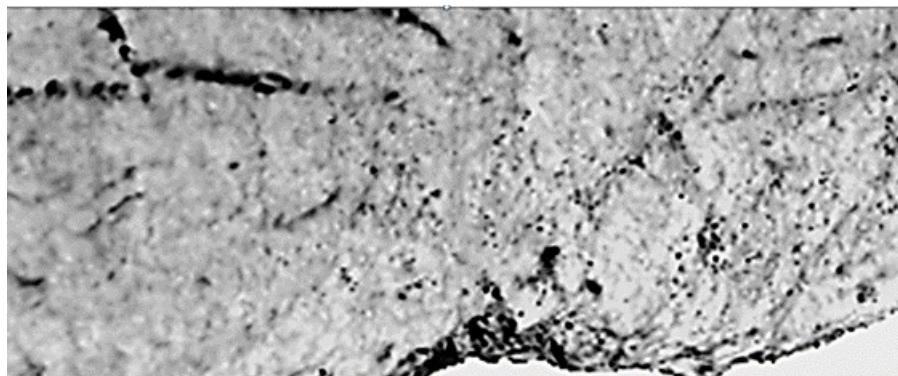


Рис.15 . Распределение газовых включений в нижней части образца, примыкающей к каналу подачи газа. Фото А.Н. Хименкова [\[5\]](#)

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

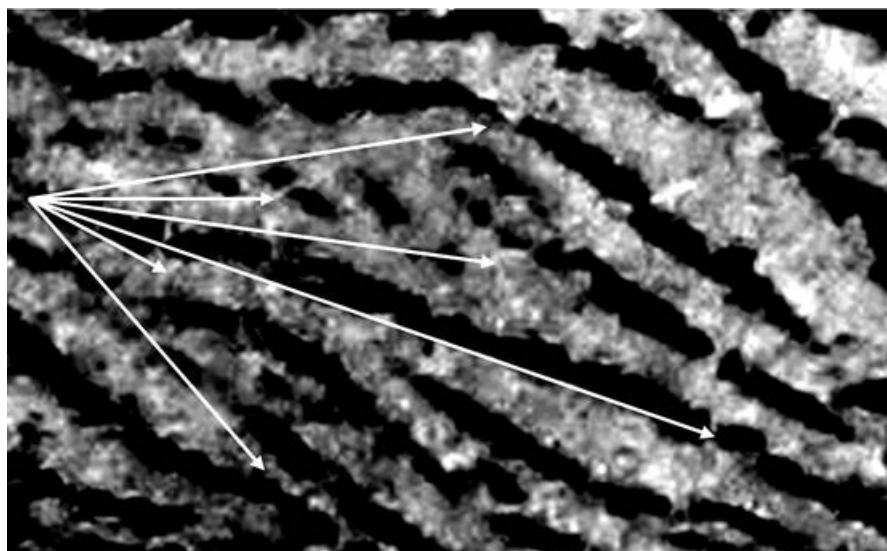


Рис. 16. Фильтрационные каналы, прорывающие первичные слоистые. Фотография сделана в отражённом свете. Светлые полосы - каолиновая глина, темные – шлиры льда. Стрелками указаны места нарушения сплошности ледяных шлиров. Фото А.Н. Хименкова [\[31\]](#).

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

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

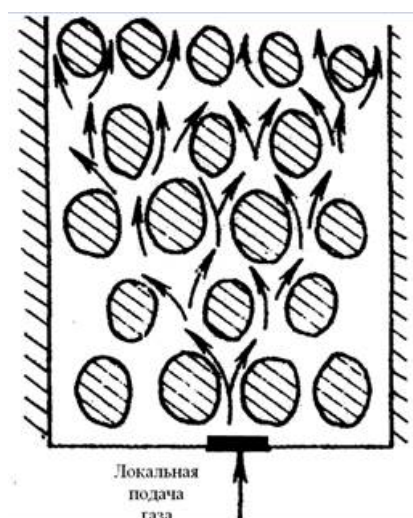


Рис.17. Рассеяние газа в мёрзлом грунтовом образце,

подаваемого из локального источника (с использованием материалов.

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

Китайскими исследователями были проведены эксперименты по изучению процессов,

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

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



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



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

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

Обсуждение

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Заключение

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

Можно выделить следующие основные направления данных исследований:

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

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

Библиография

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

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

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

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

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

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

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

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

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

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

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

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

Однако есть ряд вопросов, в частности:

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

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

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

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

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

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

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