

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Хименков А.Н., Станиловская Ю.В. Воронки газового выброса, как объект геокриологии (Часть 3 "Локальные газодинамические геосистемы") // Арктика и Антарктика. 2025. № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.4.73827 EDN: QEEPFU URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=73827

Воронки газового выброса, как объект геокриологии (Часть 3 "Локальные газодинамические геосистемы")

Хименков Александр Николаевич

кандидат геолого-минералогических наук

ведущий научный сотрудник; Институт геоэкологии РАН

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

✉ a_khimenkov@mail.ru



Станиловская Юлия Викторовна

Специалист по взаимодействию инфраструктуры и мёрзлых пород, Тоталь

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

✉ e-mail:ulyia.stanilovskaya@total.com



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

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.4.73827

EDN:

QEEPFU

Дата направления статьи в редакцию:

25-03-2025

Аннотация: Объектом исследования данной публикации являются локальные криогенные газодинамические геосистемы, развитие которых приводит к пневматическому взрыву и формированию воронок газового выброса. Предметом исследования являются криогенные образования, зафиксированные в мёрзлых породах слагающих воронки газового выброса, обнаруженные на севере Западной Сибири. Авторы подробно рассматривают криогенные образования обнаруженные в разных элементах воронок, анализируют их строение, морфологию, пластические и разрывные деформации. Особое внимание уделено процессам, в результате которых могли

сформироваться те или иные криогенные элементы, например кольцевые структуры, ячеистые льды, разрывные структуры на поверхности кратеров. Вследствие слабой изученности многих криогенных процессов зафиксированных в воронках широко использовались аналогии из других областей технических и естественных наук. В настоящее время основное внимание исследователей, приковано к поиску гипотетических схем связи генезиса газа с образованием воронок газового выброса. Авторы в своей работе показали, что без учёта криогенного фактора, проблему пневматических взрывов в многолетнемёрзлых породах, даже если будет вопрос о генезисе газа, решить невозможно. Основным методом, используемым в данной статье, является анализ материалов научных публикаций по рассматриваемой теме, а также данных лабораторного моделирования проведённого авторами. Синтез анализируемых материалов осуществлялся на базе геосистемного подхода. Новизна исследования заключается в обосновании криогенной основы стадийного развития газодинамической геосистемы в мёрзлых породах, обуславливающей подготовку пневматического взрыва и формирования воронок газового выброса. Впервые выделены четыре стадии развития криогенной газодинамической геосистемы в мёрзлых породах. Стадия первичного формирования газонасыщенной области с повышенным давлением внутригрунтового газа, расположенная в основании газодинамической геосистемы. Стадия формирования транзитной зоны перераспределения внутригрунтового газа. Завершающая стадия, на которой давление газа, в её верхней части, достигает значений, превышающих прочность перекрывающих грунтов. Финальной стадией развития криогенной газодинамической геосистемы, является пневматический взрыв, формирующий воронку газового выброса. Основные выводы проведённого исследования следующие: процессы, подготавливающие формирование воронок газового выброса, являются криогенными. Они обусловлены структурно-текстурными особенностями мёрзлых пород, массообменными процессами и фазовыми переходами, происходящими в них, а также их прочностными и деформационными свойствами.

Ключевые слова:

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

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

1. Введение

До настоящего времени проблема газодинамических процессов в многолетнемёрзлых грунтах не рассматривалась. Обнаружение и изучение воронок газового выброса на севере Западной Сибири заставил обратить на неё внимание. В предыдущих частях публикации были рассмотрены различные элементы криогенного строения большинства известных воронок газового выброса [\[1, 2\]](#). Первопричиной формирования всех воронок является формирование локальных газонасыщенных зон с повышенным давлением. Напорное воздействие газов на перекрывающие мёрзлые грунты, являясь ведущим фактором, обусловило общую направленность и последовательность стадий развития локальных газодинамических геосистем с соответствующими парагенезами криогенных

процессов и криогенных образований, обнаруженных в различных воронках. Различия в их строении отражают локальные особенности (геологическое и криогенное строение, параметры и морфология воронок газового выброса, давления газа и др.) при подготовке пневматического выброса.

Морфология воронок, их структурные элементы, вертикальные и горизонтальные размеры тщательно проанализированы в многочисленных публикациях. При этом, особенно их криогенное строение изучены гораздо слабее. Вероятно, это связано с тем, что большинство исследователей, изучавших объекты в полевых условиях, целенаправленно этой теме не уделяли внимания. Наибольшие трудности в понимании развития газодинамических геосистем, приводящих к появлению воронок газового выброса, является полное отсутствие теоретических разработок, касающихся напорного воздействии внутригрунтовых газов на мёрзлые породы. Поэтому мы воспользовались методом аналогий. На примере результатов исследования сходных динамических условий и соответствующих им образований, полученных при исследовании геологических и техногенных объектов, а также лабораторного моделирования удалось выявить некоторые особенности процессов, происходящих в воронках газового выброса.

2. Исходные материалы

Основным исходным материалом являются видео и фото изображения криогенных образований, сделанных в воронках газового выброса, обнаруженных к настоящему времени, и представленных в научных публикациях различных изданий. Кроме того были проведены лабораторные исследования возможности фильтрации газа в мёрзлых грунтах.

3. Методы исследования

Основным методом, используемым в данной статье, является анализ фото и видео материалов, фиксирующих различные элементы криогенного строения воронок газового выброса, приведённых в различных открытых источниках. Синтез анализируемых материалов, осуществлялся на базе геосистемного подхода. Вследствие слабой разработанности рассматриваемой темы, и незначительного объёма исходных фактических материалов был использован метод аналогий с привлечением материалов из различных областей наук о Земле, строительства, инженерной геологии и др. При изучении возможности насыщения газом мёрзлых грунтов использовался метод лабораторного моделирования.

4. Новизна исследования

Новизна исследования заключается в том, что рассмотрение вопросов, связанных с изучением напорных процессов в многолетнемёрзлых грунтах осуществляется посредством анализа строения криогенных структур. Такой подход ранее в научной литературе не использовался. Практически не изучены слоистые ледогрунтовые структуры, в том числе и кольцевые, формирующиеся при сдвиговых деформациях, и смещении блоков мёрзлых пород относительно друг друга. Такие смещения возникают в растущих многолетних буграх пучения, в повторно жильных льдах, основаниях курумов и каменных глетчеров. В статье предложена гипотеза формирования кольцевых структур, воронок газового выброса. Новым является и анализ строения и разработка гипотезы формирования сотовых льдов, уникальных криогенных образований, формирующихся при газодинамических процессах в многолетнемёрзлых грунтах. Впервые предложена гипотеза стадийного взрывного процесса при формировании воронок газового выброса

5. Результаты

Общим для всех воронок газового выброса является возникновение локальной газонасыщенной зоны с аномально высоким давлением газа. Уточним, что данная зона интересует нас только как начальная фаза формирования газодинамической геосистемы, поэтому ни причины локализации газа, ни его генезис не рассматриваются.

Практически все обнаруженные воронки газового выброса в мёрзлых грунтах имеют трёхчленное строение. Данный вопрос подробно рассмотрен во 1 и 2 частях публикации [\[1, 2\]](#). В нижней части воронок наблюдается расширение, или в виде сплошной полости, или серии каверн и гротов. В расположенной выше средней части поперечное сечение воронок сужается. В верхней части наблюдается расширение, в форме усечённого конуса. Вокруг воронок, как правило, располагается брустверкоццевой формы, состоящий из выброшенных мёрзлых грунтов.

Газовые трубы в субаквальных морских осадках

Для лучшего понимания процессов происходящих в осадочных толщах под воздействием напорных газов воспользуемся концептуальной моделью формирования газовых труб в субаквальных осадках, разработанной на основании сеймических исследований шельфа. На рис. 1 концептуальная модель формирования газовой трубы в морских осадках. Формирование трубы начинается с формирования зоны избыточного давления фокусированного потока жидкости и газа. Увеличение давления вызывает гидравлический разрыв и разрушение водонепроницаемого слоя в перекрывающей толщи осадков (а). Поток жидкости минеральных частиц и газа по трещинам распространяется вверх в виде цилиндрического канала (б). Давление жидкости нарастает, в верхних горизонтах осадков происходит деформация (куполообразование) морского дна. Нарастание давления приводит к выбросу минеральных частиц, жидкости и газа. Они выталкиваются в водную толщу и на морское дно, формируя кратер (с). [\[3\]](#). По мере распространения флюидов вверх поток самоорганизуется, создавая давление в верхних горизонтах осадочной толщи. Увеличение давления вызывает разрушение покрывающей породы путем гидравлического разрыва. Происходит выброс жидкости, осадков, газов, в результате чего формируются кратеры выброса чащебразной формы около 100 м в поперечнике и глубиной около 20 м [\[3\]](#).

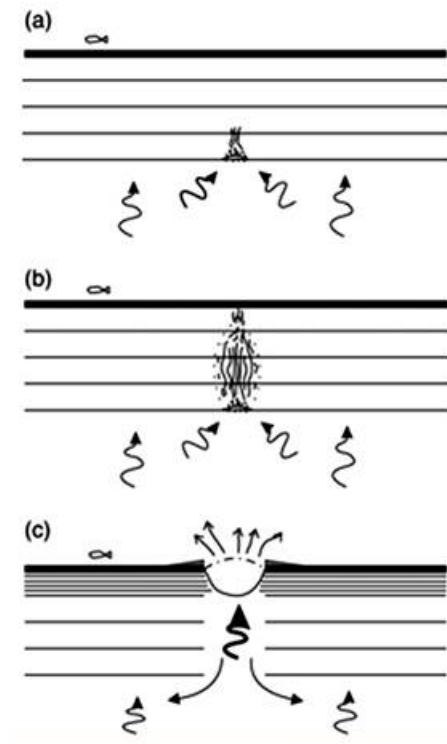


Рис. 1. Концептуальная модель формирования газовой трубы [\[3\]](#).

Уточнение модели формирования труб при гидроразрыве приведено в работе Д. Картрайта и К. Сантамарина. Начальная трещина зарождается и распространяется вверх от границы раздела между слоем с избыточным давлением и перекрывающим его водонепроницаемым слоем. По мере того, как жидкость выходит из зоны избыточного давления, сеть приуроченных к первичной трещине гидроразрывов, распространяется вверх с некоторым расширением трещиноватой зоны. Вследствие повышенной проницаемости грунтов поток жидкости по трещиноватой зоне фокусируется с образованием цилиндрического канала (трубы) [\[4\]](#).

В данных и других работах посвящённых формированию газовых труб в морских осадках отмечается их стадийность и морфологические особенности. Прежде всего, формирование зоны избыточного давления в толще субаквальных осадков. Затем гидравлический разрыв перекрывающего изолирующего горизонта, с последующим развитием над ним трещиноватой зоны. При этом, зона разрыва по размерам меньше чем зона избыточного давления. По трещиноватой зоне формируется сфокусированный цилиндрический поток жидкости и газа деформирующий кровлю в виде куполообразного поднятия. В конечной фазе нарастающее давление приводит к выбросу минеральных частиц, жидкости и газа и образованию кратера по размерам, превышающим размеры газовой трубы. Рассмотренные примеры, хотя и соответствуют талым грунтам, отражают последовательность процессов миграции рассеянных газов в водонасыщенных осадках с последующей закономерной стадийностью формирования сменяющих друг друга структур. Наблюдается схожая общая последовательность смены процессов и морфологических элементов при формировании воронок газового выброса в мёрзлых грунтах [\[1\]](#) и газовых труб в субаквальных осадках. Эта последовательность, вероятно, определяется высокой подвижностью газовых флюидов, их способностью легко проникать по малейшим деформациям в толщу грунтового массива. При этом свойство газа сжиматься и создавать значительные давления при попадании в замкнутое

пространство обуславливает возможность пневматического взрыва в случае ослабления прочности вмещающей толщи. Газ проявляет отмеченные свойства одинаково во всех грунтовых средах.

Нижняя расширенная часть воронок

Основной особенностью строения нижних расширенных частей воронок является наличие в них полостей. Следует учитывать, что данное образование фиксируется уже после взрыва. Данных о строении мёрзлого газонасыщенного грунтового массива, в рассматриваемой локальной зоне, существовавшего до взрыва, не имеется.

Длительное время тема формирования газовых полостей и газонасыщенных зон с повышенным пластовым давлением в многолетнемёрзлых грунтах не привлекала внимание исследователей. Обнаружение воронок газового выброса указывает на необходимость уделить данной проблеме большее внимание. Анализ материалов полевых и лабораторных исследований позволяет выделить 2 типа строения газонасыщенных зон с повышенным давлением в мёрзлом грунтовом массиве:

- полости свободного газа, сформировавшиеся в результате пневморазрыва;
- массивы мёрзлых грунтов, насыщенные мелкими газовыми включениями в виде каверн;

Рассмотрим выделенные типы.

Газовые полости, связанные с пневморазрывом грунтовой толщи

Повышение пластового давления внутригрунтового газа снижает литостатическое. Когда давление в газонасыщенном горизонте достигает некоторого критического значения, происходит его разрыв. Для образования трещин в грунтовом массиве достаточно, чтобы давление газа достигало 75–90 % литостатического давления [\[5\]](#). Данный процесс применяется достаточно широко в инженерной геологии при использовании технических средств, для разрыва горной породы сжатым газом [\[6\]](#). В естественных условиях при создании условий длительного накопления газа в мёрзлом грунтовом массиве газовые пузырьки, в которых газ находится под высоким давлением, будут сливаться. Это в конечном итоге может приводить к пневморазрыву сплошности и формированию крупных газовых полостей в виде каверн размером в десятки сантиметров, а то и метров, в поперечнике. Газ в подобных крупных полостях может находиться под давлением, превосходящим литостатическое. Сведений о наличии газовых полостей в толще многолетнемёрзлых пород в естественных условиях, образование которых можно связать с пневморазрывом, в научной литературе не встречается, поэтому воспользуемся материалами лабораторного моделирования.

Китайскими исследователями были проведены эксперименты по изучению процессов, связанных с напорным воздействием газа на грунтовую толщу [\[7\]](#). 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 формировалась газовая полость (газовый мешок). Процесс образования газовой полости экспериментаторы разделили на три стадии: начальную, позднюю и конечную. Образование газового мешка начинается с появления горизонтально ориентированной трещины, приуроченной к границе песка и ила. Затем часть трещины начинает утолщаться. В этом месте формируется газовый пузырь, который начинает расти вверх, что вызывает поднятие верхнего мелкозернистого слоя, при этом избыточное давление остаётся практически неизменным (рис. 2). По мере увеличения

объема газа в илистом грунте наблюдается развитие нескольких зон деформаций. Непосредственно над газовым пузырём образовалась зона сжатия с чётко выраженным уплотнённым ядром в виде конуса. Над ней наблюдаются пластические деформации илистого осадка. Между этими двумя зонами и недеформированным массивом происходит смещение илистого грунта и формируется узкая слоистая зона сдвиговых деформаций. В верхней части образца получают развитие разрывные деформации в виде вертикально и наклонно ориентированных трещин. В рассмотренном эксперименте получает развитие комплекс парагенезов процессов и соответствующих им образований, обусловленных напорным воздействием газовой полости с повышенным давлением.



Рис. 2. Газовый мешок (в нижней части фотографии) и вызванные его формированием пластические и разрывные деформации грунта [\[7\]](#).

Оценивая в целом результаты лабораторного моделирования напорного воздействия газа на водонасыщенные грунты можно отметить некоторые признаки, схожие с воронками газового выброса. Прежде всего, это формирование локальной области повышенного давления газа, воздействие которой приводит к развитию деформированной зоны над газовой полостью. Её смещение относительно вмещающей толщи приводит к формированию между ними слоистой зоны сдвиговых деформаций, аналогичной наблюданной в воронках газового выброса [\[2\]](#). Сама зона деформаций является каналом фильтрации газа, поднимающегося сквозь мёрзлую толщу вверх. Пластические деформации в верхней части образца соответствуют деформациям мёрзлой кровли над газонасыщенной зоной.

Мёрзлые газонасыщенные грунты

Формирование локальных газонасыщенных зон в многолетнемёрзлых грунтах может происходить за счёт накопления в них газовых включений различных размеров и морфологии. Это может происходить в трех случаях: криогенной фиксации локальных газовых включений, содержащихся в талых газонасыщенных грунтах; криогенной концентрации рассеянного газа при эпигенетическом промерзании, а также за счёт

фильтрации газа сквозь мёрзлые грунты [\[8\]](#). Рассмотрим некоторые примеры строения газонасыщенных зон в естественных условиях и в образцах, полученных в ходе лабораторного моделирования.

Верхние слои многолетнемёрзлых пород (до 100 м) над нефтегазовыми месторождениями часто содержат значительное количество свободного газа под избыточным давлением. В этом случае формируются зоны повышенной газовой микро- и макропористости. Результаты расчетов показывают, что на полуострове Ямал в интервале глубин от 0 до 50 м встречаются слои суглинков, имеющих газовую пористость 5–10 % в отдельных образцах до 50 % [\[9\]](#). В многолетнемёрзлых породах при бурении часто наблюдается выброс находящихся под давлением внутримерзлотных газов. В районе Бованенковского НГКМ более 85% данных выбросов зафиксировано на глубине порядка 60–80 м. Отличительной особенностью пород данного горизонта является наличие каверн изометричной формы диаметром 5–8 мм и глубиной до 7 мм. Стенки каверн гладкие, сами каверны часто заполнены фирноподобным снегом. Газосодержание в грунтах в этих условиях достигает $0,5 \text{ см}^3/\text{г}$. Количество газа в них превышает свободную пористость на два-три порядка, что вероятно свидетельствует о гидратной формой нахождения газа [\[10\]](#). В воронках газового выброса наличие полостей также прослеживается. Например, в Ямальском кратере выделяются разнообразные скопления каверн размером от нескольких сантиметров до десятков сантиметров [\[11\]](#).

Формирование газовых включений за счёт нагнетания газа в мёрзлый грунт было выявлено в ходе лабораторного моделирования. Нами проводились эксперименты по изучению воздействия сжатого газа на мёрзлые грунты. В образец мёрзлого грунта через вмороженный штуцер подавался сжатый газ под давлением $4 \text{ кг}/\text{см}^2$. Температура образца, при этом, составляла $-1 - -0,5^\circ\text{C}$. В результате формируется сеть многочисленных изгибающихся, соединяющихся и ветвящихся газовых каналов, имеющих общее направление, пронизывающих мёрзлый массив и деформирующих ранее сформировавшиеся криотекстуры. Сами газонасыщенные зоны имеют различную морфологию: вытянутые цепочки газовых пузырей, изометричные скопления газовых пузырей, вытянутые газовые полости, сотовые газовые структуры, разделённые ледогрунтовыми оболочками. В нижней части образца, вблизи штуцера подачи газа, грунт усеян мелкими (около 1 мм) ячейками (рис. 3), представляющими собой углубления различной морфологии.



Рис. 3. Газонасыщенная часть грунтового образца на расстоянии 3-5 см

от штуцера подачи газа. Фото А.Н. Хименкова

В зоне непосредственного контакта штуцера и грунта сформировалась сотовая структура, представляющая из себя скопление газовых пузырьков разделённых тонкими грунтовыми оболочками (рис. 4, 5).

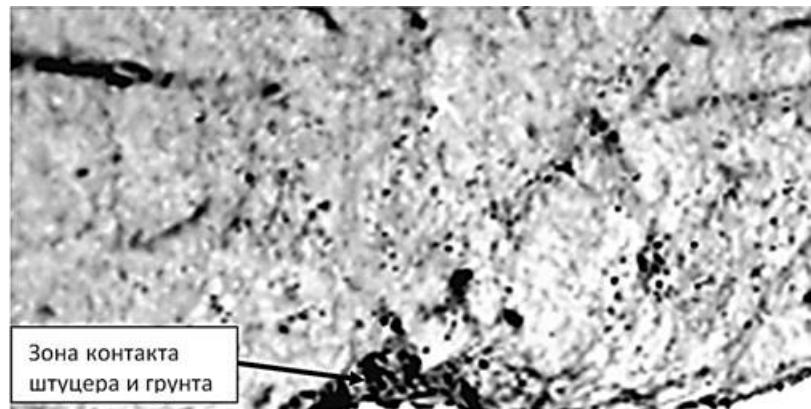


Рис. 4. Газовые включения вблизи штуцера подачи газа

Фото А.Н. Хименкова

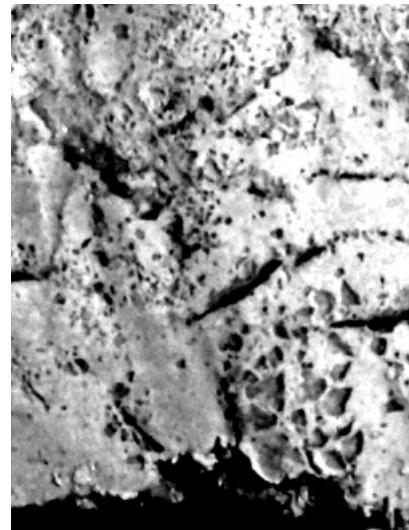


Рис. 5. Газовые включения вблизи штуцера подачи газа

Фото А.Н. Хименкова

В ходе проведения экспериментов срезах была обнаружена сеть остроконечных ячеек, образовавшихся вблизи штуцера, ориентированных вершинами острых углов в направлении от штуцера. Размеры ячеек по мере удаления от штуцера уменьшаются, а затем сменяются веерообразными образованиями, состоящими из тонких расходящихся каналов. Рисунок газовых ячеек иллюстрирует движение газовых пузырьков, проталкиваемых под давлением сквозь мёрзлый грунт. При удалении от штуцера подачи

газа морфология газовых включений меняется. Газовые каналы приобретают форму ветвящихся, искривлённых, субвертикально ориентированных каналов толщиной в доли миллиметра. На рис. 6 показано, особенности распространения газовых каналов в горизонтально ориентированных слоистых шлирах льда толщиной около 1 мм, разделённых грунтовыми прослойками 2 - 3 мм. Субвертикально ориентированные газовые каналы разрывают шлиры льда и сдвигают их, не разрушая их общую ориентацию.

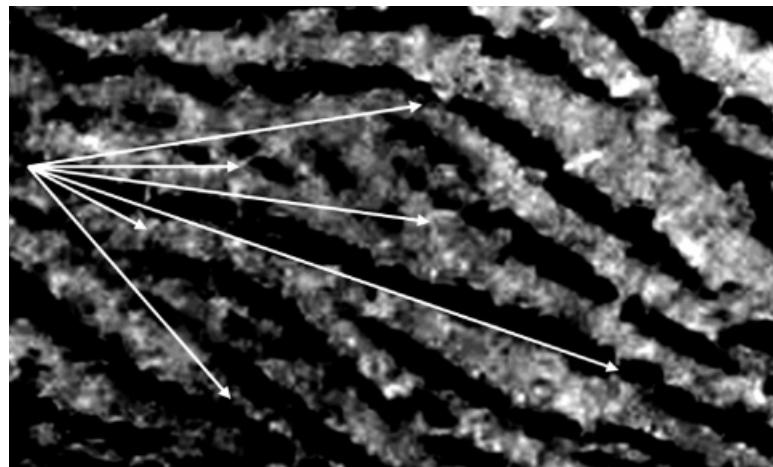


Рис. 6. Фильтрационные каналы, прорывающие первичные слоистые криогенные текстуры. Съёмка в отражённом свете. Фото А.Н. Хименкова

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. Механизм распределения газового потока в мёрзлом грунте подобен механизму гидравлической дисперсии, процессу рассеивания вещества в пористой или трещиноватой среде [11]. Данный процесс обусловлен неоднородностью поля скоростей движения вещества, обусловленной извилистостью поровых каналов в породе и разной площадью их реального сечения (рис. 7). Можно предположить, что при движении газа сквозь мёрзлые грунты будут развиваться схожие процессы.

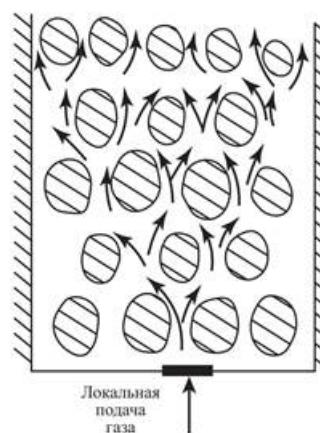


Рис. 7. Рассеяние газа в мёрзлом грунтовом образце, подаваемого из локального источника [11].

Формирование субвертикальных газовых каналов наблюдаемых в мёрзлых образцах при лабораторном моделировании аналогично распределению газа непосредственно в Ямальском кратере.

Средняя, сужающаяся часть воронок

Сужающаяся часть воронок газового выброса представляет из себя транзитную зону, по которой газ из расширенной области аномально высокого давления газа, движется вверх. Для лучшего понимания данных процессов воспользуемся моделью формирования газовой трубы, предложеной Jonathan M. Bull с коллегами (рис. 8) [\[12\]](#). Данная модель, основанная на геофизических исследованиях, разработана для описания механизма формирования субаквальных выходов газа (сипов). Она базируется на положении, что в поверхностных отложениях, в газонепроницаемых слоях под воздействием тектонических разломов происходит разрыв с последующей миграцией газонасыщенных поровых флюидов. Воздействие образовавшегося потока газонасыщенных вод приводит к реактивации ранее существовавших трещин, либо к открытию новых. В результате образуется локализованная система связанных трещин в виде газовой трубы, по ним газонасыщенные поровые флюиды проникают вверх.

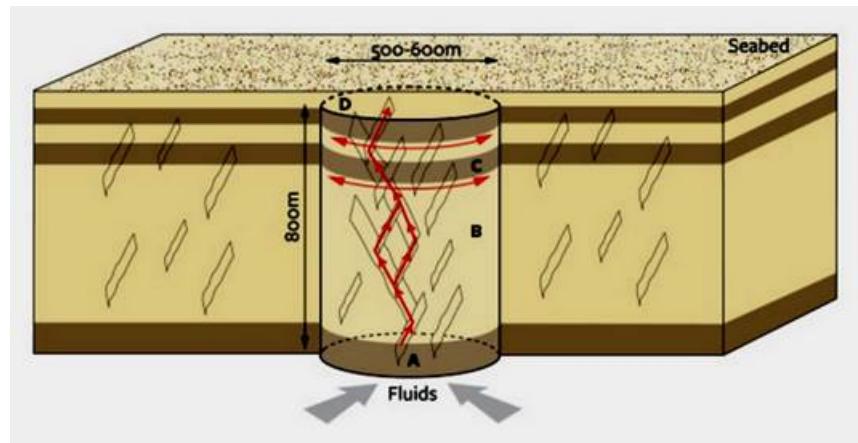


Рис. 8 Концептуальная модель сейсмического газового канала, залегающего близко к морскому дну [\[12\]](#).

При первичном разрыве сплошности (A) поровые жидкости и газы вызывают распространение трещин (B), позволяя флюидам подниматься из-за повышенного давления жидкости. При наличии непроницаемых слоёв в приповерхностных горизонтах, газоводяные флюиды будут мигрировать в горизонтальном направлении формируя газовые карманы (C). Некоторые трещины могут распространяться близко к поверхности (D) или даже разрывать морское дно. В случае недостаточного давления, вышележащие слои отложений могут рассеивать вертикальный поток, затрудняя прямое обнаружение на поверхности [\[12\]](#).

Данные представления вполне можно использовать для понимания механизмов формирования воронок газового выброса. В общем виде механизм подготовки взрыва можно представить в виде следующих стадий. Газ, находящийся под давлением, начинает фильтроваться в перекрывающие мёрзлые грунты. Это проникновение

значительно ослабляет прочность вмещающего массива, вызывает пластические и разрывные деформации. Появившиеся трещины и дислокации ускоряют фильтрацию газа. Формируется фильтрационный поток, в котором газовый флюид из области с большим давлением, фильтруется в область с меньшим давлением (как правило, по направлению к поверхности). Высокое давление газа в нижней части воронки посредством фильтрации пузырьков газа транспортируется наверх к газонепроницаемой низкотемпературной мёрзлой кровле.

Установившееся в массиве мерзлых грунтов «единое фильтрационное пространство» неоднородно, в различных его частях возникают градиенты давления, обеспечивающие локальную изменчивость деформаций и распределение газа в мерзлой толще. Совокупность данных процессов, определяемая авторами как фильтрационно-деформационный механизм [13], позволяет газовым флюидам проникать вглубь льдистого мерзлого массива. Насыщаясь газом, мерзлые грунты начинают набухать, т.е. изменять (увеличивать) свой объем. В результате в них возникает сложное объемное напряженно-деформированное состояние. При этом напряжения набухания в радиальном направлении будут компенсироваться реакций окружающих толщ. Набухание мерзлых грунтов приводит к их сдвигу в вертикальном направлении. В этой силовой ситуации смещаться вверх быстрее будут те части, которые уменьшили свои прочностные свойства и расположены ближе к оси симметрии массива многолетнемерзлых грунтов, отчего в результате на поверхности появится бугор. Одновременно с напряжениями набухания необходимо учитывать и вертикальные усилия, источником которых является давление газа, находящегося в свободном пространстве в нижней части воронки. Эти силы, действуя в одном направлении, сдвигают газонасыщенные ММГ вверх. Суммарная величина указанных сил должна превышать прочность мерзлых грунтов (льда) на срез для того, чтобы сдвинуть их вверх [14].

Кольцевые структуры

Одним из самых распространённых элементов строения воронок газового выброса являются кольцевые структуры, формирующие стенки воронок. Их возникновение определяется медленным нарастанием сдвиговых нагрузок на контакте газонасыщенного ледогрунтового штока, образовавшегося над зоной избыточного давления газа, с вмещающим массивом мёрзлых пород.

В геокриологии изучение структурно-текстурных изменений при приложении нагрузок к мёрзлым породам продолжается уже около ста лет. По результатам лабораторных исследований Н. А. Цытовичем [15], С. С. Вяловым [16], Э.Д. Ершовым [17, 18] и др., было выявлено, что при одноосном деформировании компрессионном уплотнении и сдвиге происходит преобразование микростроения мёрзлых пород. В зависимости от интенсивности приложения нагрузки или скорости деформирования мёрзлых пород характер преобразования их микростроения различен.

При высоких скоростях деформирования мёрзлые породы ведут себя в целом, как хрупкие тела, структурно-текстурные изменения которых, проявляются преимущественно в результате процессов трещинообразования. Формируются сетки трещин распространяющихся преимущественно по ледяным включениям, при этом крупные включения разрушаются в большей мере, чем мелкие. С повышением льдистости степень разрушения включений льда увеличивается.

Совсем иные структурно-текстурные изменения наблюдаются при небольших скоростях и длительных механических воздействиях на мёрзлые породы. С уменьшением скорости

деформирования происходит переход от хрупких, к вязкопластическим деформациям. При малых скоростях увеличивается вклад процессов структурообразования и массобмена, связанных с течением плёнок незамёрзшей воды [\[17\]](#). Эксперименты, проводившиеся в 1976–1978 гг. на кафедре геокриологии МГУ, показали, что при медленном (от 5 до 25 сут.) сдвиге, в ходе воздействия на образец градиента напряжений, происходит перераспределение влаги. В области сдвига наблюдается новообразование сегрегационных прослоев льда либо перестройка существовавшей криогенной текстуры. Происходит интенсивное преобразование микротекстур, переориентация микропрослоев льда вдоль плоскости сдвига, изменение их геометрии и взаиморасположения (рис. 9) [\[18\]](#).

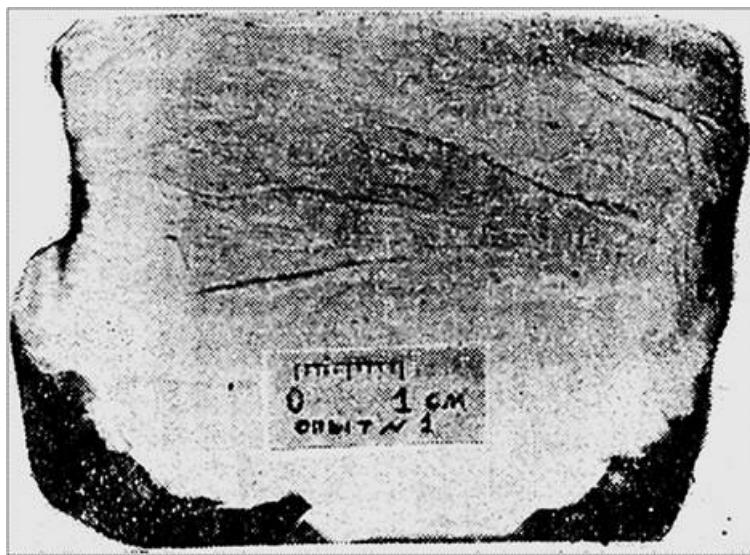


Рис.9. Криогенная текстура, сформировавшаяся в зоне сдвига в образце каолинитовой глины (до опыта образец имел массивную криогенную текстуру) [\[16\]](#).

Полученные в лабораторных условиях данные о перестройке криогенного строения в зоне сдвиговых деформаций не были использованы на практике при исследовании природных объектов. А такие объекты имеют широкое распространение в криолитозоне, это бугры пучения, повторно-жильные льды, внутргрунтовые локальные зоны со следами динамических процессов, каменные глетчеры, курумы воронки газовых выбросов. В качестве примера приведём результаты исследования Э.И. Галеевой с соавторами [\[19\]](#), изучавшими строение слоистого ледогрунта с субвертикальной ориентировкой плоскости слоёв (кольцевая структура), формирующую стенки Ямальского кратера. Было показано, что слоистость обусловлена вязкопластическим течением льда. Кристаллы в слоях удлинённые, ориентированы длинной стороной в направлении общей слоистости (рис. 10). В результате сформировалась зона, где наблюдается чередование слоёв льда толщиной 0,5 – 2,5 см с минеральными слоями толщиной 0,2 – 1 см. Во льду наблюдаются включения мелких пузырьков газа диаметром около 0,01 см расположенных хаотично или параллельно включениям. Данные образования свидетельствуют о движении газонасыщенного ледогрунтового массива относительно неподвижной вмещающей толщи льдистых мёрзлых пород. Сдвиговые деформации приводят к формированию, вторичной слоистости, под углом до 60° к горизонтально ориентированной первичной слоистости [\[19\]](#).

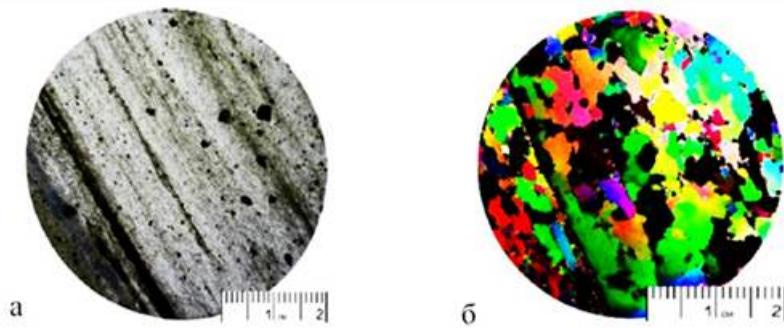


Рис. 10. Лёд из воронки газового выброса (Ямальский кратер) [\[19\]](#).

К сожалению, немногочисленные опубликованные результаты лабораторных исследований и данных по единичным обследованиям природных объектов, при всей своей важности, не позволяют разработать целостные представления о строении кольцевых структур и зоны сдвиговых деформаций в воронках газового выброса. Для этого воспользуемся аналогиями из других областей геологии, где наблюдаются подобные процессы.

Среди наиболее изученных геологических образований, близких по свойствам пород, морфологическим признакам и процессам к буграм пучения наблюдаемым в криолитозоне и, соответственно, к воронке газового выброса, являются соляные купола. Их основные пордообразующие минералы лёд и соль легко деформируются под влиянием механических нагрузок (рис. 11). У них сходный динамический режим внедрение во вмещающие породы. Следовательно, должно быть сходным и их строение.

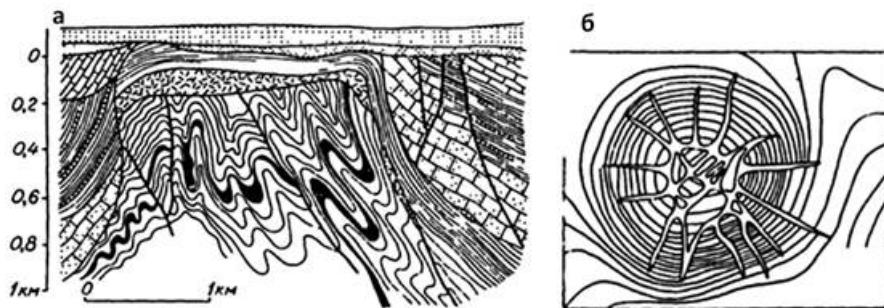


Рис. 11. Соляной купол в Клодове, Польша; а - сложная дисгармоничная складчатость течения в ядре (по М. Ксенжкевичу, Я. Самсоновичу, 1965). б - радиальная и концентрическая системы сбросов соляного купола Клей-Крик, побережье Мексиканского залива (по Л. Паркеру, А. МакДоуеллу) [\[20\]](#).

В соляных куполах различают ядро, сложенное пластичными породами, и окружающие ядро и прорванные им менее пластичные и более тяжелые толщи. Внутренняя структура ядра характеризуется сложным строением. Слагающие его пластичные породы смяты в типичные складки течения, направленные к земной поверхности, слои при этом растягиваются, образуют сложные изгибы, раздувы и нередко разрываются. Вмещающие толщи у границ с ядром выгнуты вверх, сильно раздроблены, часто запрокинуты,

нарушены многочисленными разрывами и поверхностями скольжения, по которым отдельные пачки и пакеты слоев отрываются и перемещаются вслед за ядром на значительные расстояния. Таким образом, в диапировых структурах сочетаются два вида складок: в активном ядре развиваются складки течения, а окружающие ядро толщи подвергаются поперечному изгибу [20]. Следует обратить внимание на изгибание вверх вмещающих пород. Кольцевые структуры воронок газового выброса формируются подобным образом. Также в стенках воронок и в мёрзлых породах, прилегающих к ним, наблюдается субвертикальная слоистость, многочисленные разрывы и пластические деформации [21].

Подобные образования наблюдались и при лабораторных экспериментах по продавливанию штампа сквозь слой глины (рис. 12). В этом случае было зафиксировано формирование субвертикальных трещин, приуроченных к краевым частям штампа. Здесь, в условиях сдвига в контактной зоне формируется система разрывов или трещин скальвания. Преимущественное развитие получают трещины, ориентированные под углом от 15 до 20° к генеральному сдвигу [21]. Следует обратить внимание на то, что трещины выходят за пределы размера штампа. В случае воронок газового выброса в зоне сдвиговых деформаций возникает система длинных субвертикальных сколов, трещин, пластических и разрывных деформаций, образующих кольцевую структуру. Данная зона является наиболее благоприятной для фильтрации газа, она выходит за рамки кратера, захватывая прилегающие участки мёрзлого грунта.

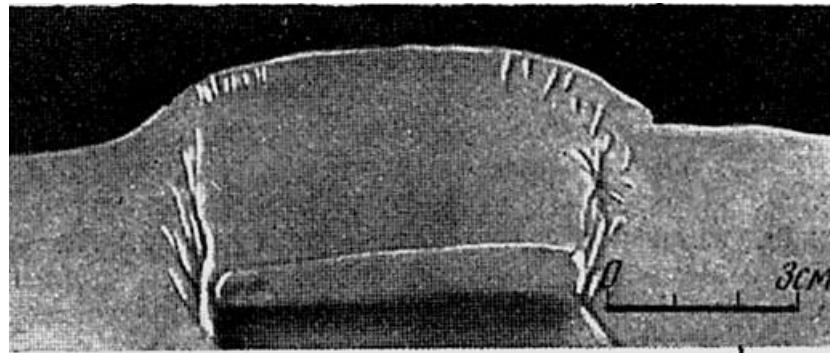


Рис. 12. разрывы при вдавлении штампа снизу вверх [21]

В естественных условиях изучать строение зоны кольцевых сдвиговых деформаций воронок газового выброса крайне затруднительно, практически невозможно. Поэтому воспользуемся для этого результатами лабораторного моделирования приразломного сдвигового течения, с параллельным плоскости разлома кливажом (рис. 13) [22].

На рис. 13 показано изменение микроструктуры кристаллического парафина в зоне приразломного смятия: I - первичная неизменённая структура; II - контакт первичной структуры с приразломной зоной смятия; III - периферия приразломной зоны смятия, линеаризация исходной структуры: показаны ограниченные параллельными разлому плоскостями скольжения линзовидные микролитоны, состоящие из зёрен в 10 раз мельче, чем в исходном кристалле; IV - осевая часть зоны смятия, милонитизация; V - фрагмент рис. IV. Показаны два шва, разграничающие микролиты и множество мелких зарождающихся трещинок [22].

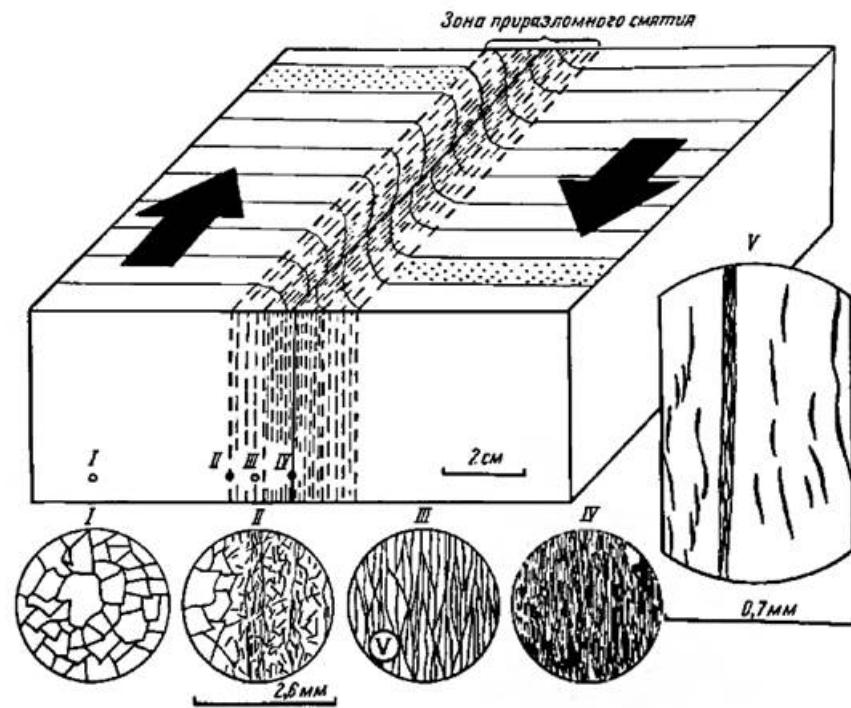


Рис. 13. Зона приразломного сдвигового течения с параллельным плоскости разлома кливажом, по результатам лабораторного моделирования. В качестве исходного материала использован кристаллический парафин [22].

Рассмотренные результаты лабораторного моделирования тектонических процессов и строения реальных геологических объектов позволяют глубже понять динамические процессы, происходящие на контакте мёрзлого газонасыщенного штока и вмещающего массива мёрзлых грунтов. Структуры, полученные в результате проведённых экспериментов близки к строению сдвиговой зоны в воронке газового выброса [2]. В обоих случаях наблюдается относительное смещение двух грунтовых блоков относительно друг друга. На границе сформированного газонасыщенного штока, и массива вмещающего мёрзлого грунта, формируется зона сдвигового течения (рис.), которая характеризуется сложной структурой.

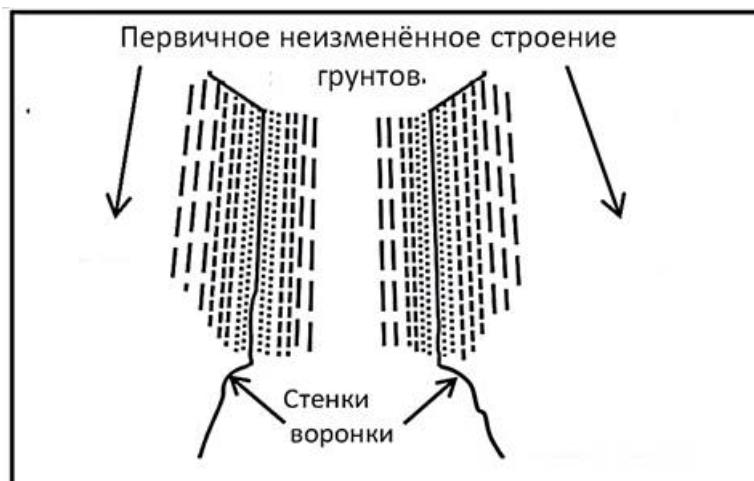


Рис. 14. Обобщённая схема строения зоны сдвигового течения

в воронках газового выброса

1 – осевая, центральная часть сдвиговой зоны; 2- средняя часть сдвиговой зоны;
3 – периферия сдвиговой зоны.

Наибольшие деформации наблюдаются в центральной (осевой) части зоны сдвигового течения. Здесь сдвиговые напряжения и разрушения первичного строения максимальны (рис. 10). На определённом расстоянии от центральной зоны общий характер деформаций сохраняется, но слоистость становится менее выраженной. На периферии сдвиговой зоны вертикальная слоистость, соответствующая плоскостям скольжения параллельным плоскостям раздела переходит к ненарушенному строению. Зона сдвигового течения имеет значительные размеры. Об этом свидетельствуют субвертикальные трещины в образцах льда и ледогрунта в скважине, пробуренной в 5 метрах от Ямальского кратера [\[2, 23, 24\]](#).

Формирование трещин способствует усиленной фильтрации газа в мёрзлый массив, что хорошо прослеживается в строении керна [\[2\]](#). Такие же трещины должны возникать и в массиве ледогрунтового штока, и также они будут способствовать проникновению газовых флюидов вверх.

Кольцевые структуры, выявлены в строении всех воронок, где имелась возможность непосредственного изучения их криогенного строения. Их строение может отличаться от строения аналогичной структуры Ямальского кратера, поскольку, исходя из заключения о зависимости преобразования строения мёрзлых грунтов от интенсивности приложения нагрузки или скорости деформирования [\[17\]](#). Например, в воронке обнаруженной А. Б. Осокиным на Ямале 26 июля 2013 [\[1\]](#), кольцевая структура отсутствует, при том, что зона сужения существует. Ледяная поверхность воронки покрыта сколами резкими выступами, что свидетельствует о быстром разрушении без длительного подготовительного этапа. В Еркутинской воронке кольцевая структура представлена серией круговых трещин [\[2\]](#). Подготовка к пневматическому взрыву и формированию Ямальского кратера продолжалась десятки лет. За это время сформировалась кольцевая структура высотой около 30 м толщина стенок которой составляет более 5 м.

Эксперименты, проведённые В.И. Соломатиным в которых на массив льда оказывалось локально ориентированное давление, при возможности бокового расширения, по нормали к действующему усилию, показали развитие структур, аналогичных кольцевым структурам воронок газового выброса. Возникающее течение выдавливания формирует структуры флюидального полосчатого сложения со слоистым расположением минеральных и газовых включений [\[25\]](#).

Сотовые льды Ямальского кратера

Самым необычным криогенным образование воронок газового выброса являются сотовые льды, приуроченные к средней, сужающейся части Ямальского кратера [\[2, 26\]](#). О генезисе данных криогенных образований, каких либо упоминаний в научной литературе не имеется. Глубже понять особенности формирования данного типа льда позволяют исследования В. В. Круковской [\[27\]](#), изучавшей особенности фильтрации газа в локальной зоне влияния шахтной выработки. В этом случае нарушается равновесное состояние породного массива. Вследствие этого возникают дополнительные поля

напряжений, под действием которых начинается фильтрация метана, содержащегося в горных породах. В результате численного моделирования при помощи метода конечных элементов с учетом напряженно-деформированного состояния углепородного массива были выявлены границы области фильтрации метана, распределение его давлений, и расходов (рис. 15). Наибольшие скопления метана приурочены к границам области фильтрации, где наблюдается наибольшее микрорастескивание породы. Здесь, по контуру свода, у границ области фильтрации, метан из газоносных пород выделяется с наибольшей скоростью и в наибольших объемах.

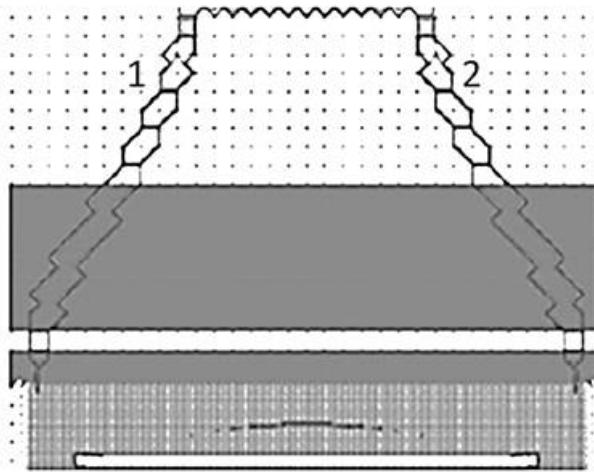


Рис. 15. Зоны наибольших скоростей и объемов выделения метана (1, 2) [\[27\]](#).

Результаты данных исследований позволяют понять причины формирования сотовых льдов, в виде узкого слоя приуроченного к зоне наибольших сдвиговых деформаций между ледогрунтовым штоком и вмещающими породами.

На примере зоны сотового льда можно проследить смену различных механизмов взаимодействия газа с мёрзлыми породами. Газовые ленты, связанные с первичной газонасыщенной зоной пронизывают массив льда и переходят выше в зону сотового льда [\[11\]](#). В свою очередь, сотовый лёд, выклиниваясь в верхней части сужающейся части воронки, переходят в динамическую зону, внедряющуюся в ледогрунтовый массив, разрывая и деформируя его [\[2\]](#). В передней части динамической зоны формируется ядро жёсткости в виде изометричного ледяного блока. О силе вдавливания можно судить по трещинам образующим клиновидный рисунок (рис. 16). Трещины также прослеживаются по нижней и верхней границы ядра жёсткости. Наблюдаются резкое несогласие слоёв, образующихся при движении ядра жёсткости и вмещающих слоёв, они прорваны и деформированы. Вдоль зоны движения прослеживаются режесяционные ленты сильно деформированного льда. Значительному воздействию подверглись и вмещающие мёрзлые породы, образующие стенки кратера. При этом перед ядром жёсткости формируется специфическая деформируемая клиновидная зона. Деформированные ячейки сотового льда, трещины ограничивающие слой сотового льда и блок льда, вдвигаемый в ледогрунтовый массив, представляет собой парагенезы криогенных образований связанных с напорным воздействием газа. Его наибольшее поступление приурочено к центральной (осевой) части сдвиговой зоны, рассмотренной ранее.



Рис. 16. Ядро жёсткости (ледяной блок) и связанные с ним деформации.

Июль 2015. Ямальский кратер Фото Лупачёва

Верхняя, расширенная часть воронок газового выброса

Газонасыщенные штоки мёрзлых грунтов, сформировавшийся в суженной части Ямальского кратера оказывает воздействие на перекрывающие слои. Слабая изученность данных процессов и недостаток фактического материала не позволяют однозначно востановить процессы непосредственно предшествующие пневматическому выбросу. Поэтому воспользуемся методом аналогий, рассмотрев особенности продавливания плоских монолитных плит железобетонными сваями. Продавливание – механизм разрушения плиты от приложенной нагрузки в виде сосредоточенных сил действующих по ограниченной площадке, связанный с разрушением плиты вокруг этой площадки с выделением части плиты в форме конуса (пирамиды). В узле сопряжения плоской железобетонной плиты с колонной возникают поперечные силы и моменты, являющиеся причиной продавливания плиты колонной. Данный процесс осуществляется только после достижения значительных пластических деформаций. Разрушение от продавливания в завершающей стадии пластического деформирования остается хрупким и ведет к мгновенной потере сопротивления [28]. Такое разрушение сопровождается образованием сначала кольцевых, а затем радиальных трещин (рис. 17 а) [29] из-за отрицательных изгибающих моментов в соответствующем направлении. После значительного увеличения нагрузки вокруг нагруженного участка на некотором расстоянии от колонны в плитах образуются тангенциальные трещины. Примерно в то же время внутри плиты вблизи колонны начинают образовываться трещины продавливания. Они распространяются под углом от 25 до 35 градусов по толщине плиты, начиная от зоны смешанного режима (изгиба и сдвига) в верхней части плиты к зоне сжатия в нижней части плиты. Вокруг колонны формируется поверхность разрушения в виде пирамиды продавливания (рис.17, б).

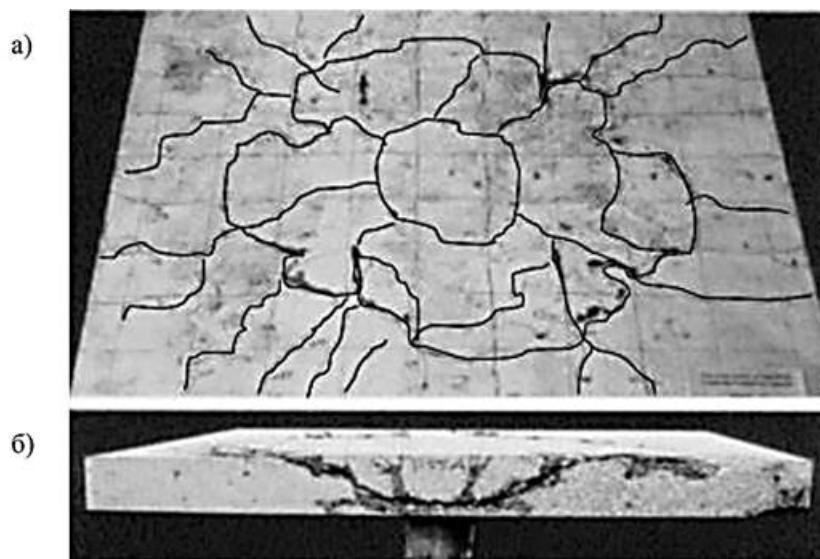


Рис. 17 – Образование пирамиды продавливания в плите

а – поверхностная зона кольцевых, и радиальных трещин

б –внутренняя зона пирамида продавливания [\[29\]](#).

В строении воронки газового выброса видна общность с морфологией пирамиды продавливания при воздействии сваи на плиту. Растигивающие усилия, возникающие при увеличении давления до значений соответствующих пределу прочности породы, приводят к её разрыву и формированию соответствующих форм на поверхности разрыва (рис. 18).

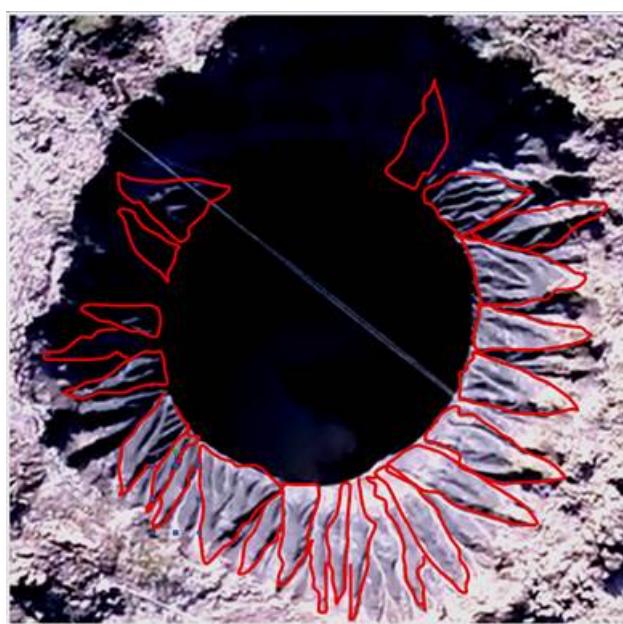


Рис. 18. Ямальский кратер. Красная линия - контуры неровностей поверхности конусообразной части воронки. Фото В. А. Пушкарёва

Давление газонасыщенного штока на перекрывающие мёрзлые грунты приводит к их растяжению и разрыву. Верхняя расширенная часть Ямальского кратера, имеет конусообразную форму и соответствует зоне радиальных трещин на поверхности

внутреннего растяжения и разрыва мёрзлой толщи под воздействием штока газонасыщенных пород (рис. 18). Аналогичная морфология рельефа на поверхности разрыва наблюдается при испытании на растяжение стальных стержней при достижении разрыва (рис. 19).

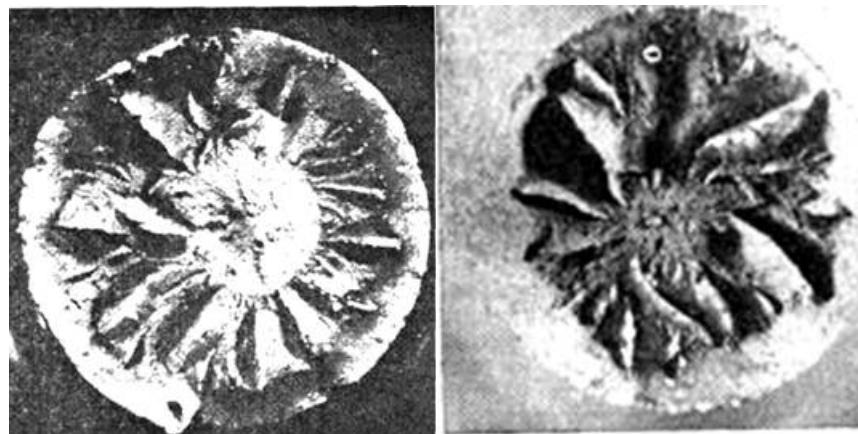


Рис. 19. Поверхность излома образцов стали после испытания на растяжение [30].

На большинстве поверхностей излома после испытания на растяжение наблюдаются волокнистая и радиальная зоны. Внутренняя волокнистая зона отвечает области медленного роста трещины. Она расположена в центре излома и окружает очаг разрушения, который обычно находится на оси растяжения или рядом с ней. Радиальная зона формируется при переходе трещины от медленного роста к быстрому или нестабильному ее распространению образуются радиальные рубцы, которые совпадают с общим направлением распространения трещины. Расходящиеся рубцы начинаются, либо от периферии волокнистой зоны, либо при отсутствии этой зоны, от самого очага излома. Точкой, в которой сходятся радиальные рубцы, является очаг излома. Эти рубцы могут быть тонкими или грубыми в зависимости от микроструктуры материала или температуры испытания. Грубые радиальные рубцы на изломах являются элементами сдвига, иногда называются радиальным сдвигом. Вдоль борозд или гребней этих радиально сдвинутых элементов можно наблюдать продольные расщепления. Эти расщепления могут быть вызваны высокими нормальными растягивающими напряжениями в результате разделения радиальных поверхностей вдоль плоскости максимального сдвига [30]. В зависимости от интенсивности воздействия флюида на породу могут наблюдаться две группы процессов. Взрывное разрушение за счёт высокой скорости приложения нагрузки и деформирования среды, и статическое разрушение, которое происходит при постоянном давлении или медленном повышении нагрузки [31]. В среде, где влияние свободной поверхности мало, взрывное разрушение протекает двустадийно. Первичное разрушение происходит на динамическом фронте дробления — поверхности, где достигается предельное упругое состояние среды и образуются макротрещины по двум механизмам: сколом — при достижении предельных сдвиговых напряжений (в ближней к центру взрыва зоне, где напряжения сжимающие), отрывом — при достижении прочности на отрыв (в дальней зоне, где действуют растягивающие напряжения). Преобладающая масса среды на фронте дробления разрушается отрывом, т.к. прочность на сдвиг в хрупких средах и горных породах значительно (на порядок и более) превосходит прочность на отрыв. В результате образуется зона радиальных трещин [32].

Рассмотренные примеры разрыва сплошной среды под воздействием локальных нагрузок моделируют процессы, непосредственно предшествующие пневматическому выбросу. Под

действием давления газа мёрзлая кровля медленно поднимается, формируя бугор пучения. При достижении определённых значений деформации в краевых частях бугра медленное движение сменяется резким отрывом кровли от мёрзлого массива. При переходе деформаций от медленного роста, к быстрому или нестабильному, формируется зона радиальных трещин отрыва. Эти расходящиеся трещины начинаются от края газовой полости. На поверхности отрыва возникает сеть радиальных трещин, которые вызваны высокими нормальными растягивающими напряжениями вдоль плоскости максимального сдвига. Разрушенная кровля выбрасывается и распределяется вокруг кратера.

Формирование газонасыщенного ледогрунтового штока

Ранее нами были рассмотрены механизмы формирования ледогрунтового тела, пронизанного многочисленными газовыми флюидами разнообразной морфологии, с которым связана подготовка пневматического выброса [1, 8, 13]. Выделим последовательность процессов, сопровождающих его развитие. Газ, находящийся под давлением в газонасыщенной зоне, начинает деформировать перекрывающие мёрзлые грунты и фильтроваться сквозь них. Появившиеся трещины и дислокации значительно ослабляют прочность грунтов, что ускоряет фильтрацию газа. Между фильтрацией газов и пластическими деформациями устанавливается парагенетическая связь, обуславливающая формирование единого фильтрационного пространства. Постепенно в нём формируется ледогрунтовый газонасыщенный шток, пронизывающий массив многолетнемёрзлых грунтов. По всей высоте штока давление в пузырьках газа будет соответствовать значениям, наблюдающимся в газонасыщенной зоне. Высокое давление в массиве многолетнемёрзлых пород с одновременным давлением снизу и развитию зоны сдвиговых деформаций приведёт к выдавливанию газонасыщенного ледогрунтового штока вверх. При этом, как в штоке, так и в контактирующих слоях вмещающих пород формируются зона кольцевых трещин, ориентированных параллельно потоку. Данная зона является дополнительным каналом поступления газа в верхние горизонты. По внешним признакам данное образование напоминает штокверк (рис. 20), т.е. рудное тело образованное массивом горной породы, пронизанной густой сетью различно ориентированных жил и мелких прожилков. Главной особенностью строения штокверков является локализация прожилков в таких зонах, где была максимальная концентрация напряжений сжатия. Затем в результате возникновения трещин скола в условиях одновременного действия сжатия со сдвигом резко повышается пустотность вмещающего массива [33, 34].

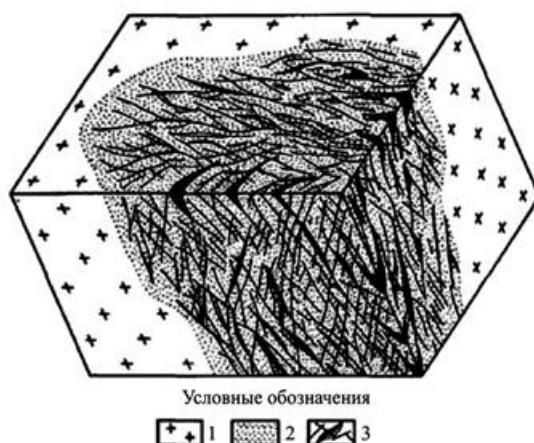


Рис. 20. Блок-диаграмма рудного штокверка, по В.И. Смирнову. Обозначения: 1 — граниты; 2 — рассеянная рудная минерализация; 3 — рудные жилы и прожилки

Приходится констатировать, что в настоящее время теории газодинамических процессов в многолетнемёрзлых грунтах не существует. Поэтому для более глубокого обоснования предлагаемой гипотезы формирования газонасыщенных штоков мёрзлых грунтов, необходимо продолжение теоретических разработок, лабораторного моделирования и изучения естественных объектов.

Особенности выброса мёрзлого грунта при пневматическом взрыве

Проведённый анализ данных по криогенным образованиям воронок газового выброса, привел нас к выводу, о том, что подготовка пневматического взрыва проходила в твёрдом субстрате мёрзлых льдистых грунтов и подземных льдов. В настоящее время в геокриологии преобладают представления о том, что льдистые грунты и подземные льды газонепроницаемы. С ними можно согласиться, лишь в том случае, если мёрзлые грунты не подвергаются силовому воздействию и деформациям. В воронках газового выброса наблюдается и силовое воздействие на мёрзлые льдистые грунты, и их деформация на всех стадиях подготовки пневматического взрыва. Во всех случаях причиной деформаций является воздействие подземного газа, находящегося при повышенном давлении. Теория газодинамических процессов, в том числе пневматических выбросов в мёрзлых породах, в настоящее время, не разработана. Для этого воспользуемся моделью стадийного выброса газонасыщенных вулканических пород, для вязких и даже застывших газонасыщенных магм разработанной М.А. Алидибировым [35]. Им предложена модель вулканического взрыва как двухстадийного процесса:

- на стадии подготовки в постройке вулкана формируется объем взрывоспособной пористой газированной магмы, обладающей потенциальной энергией сжатых газов, заключённых в поры высоковязкой или твердой матрицы и содержащих в пузырьках (порах) газ с давлением, избыточным по отношению к атмосферному;
- на стадии развития взрыва, происходит резкая декомпрессия сильновязкой магмы, что является основным фактором, вызывающим ее фрагментацию (дробление), при этом высвобождается потенциальная энергия сжатых газов и выброс продуктов дробления в атмосферу.

Фрагментация магмы начинается с момента достижения критического перепада между давлением газа в порах и давлением на ее свободной поверхности. Разрушение продолжается путем распространения фронта фрагментации, движущегося с некоторой конечной скоростью.

Взрывная волна разгрузки, постепенно продвигаясь вглубь массива, слой за слоем разрушает пористый материал. Расширение газа в сторону области низкого давления приводит к выбросу продуктов дробления в атмосферу. Причём чем ниже будет зона разрушения, тем энергичнее будет дробиться материал и дальше выбрасываться обломки. Процесс послойного разрушения происходит в течение нескольких секунд. При этом, само разрушение магмы носит хрупкий характер.

Исследователем были проведено лабораторное моделирование процессов фрагментации различных материалов при резком сбросе давления. В качестве модельного образца использовался пористый материал (пластиприн). Эксперименты на нём проводились при

комнатной температуре. При резком сбросе давления образец начинает дробиться. При перепаде давления 0.6 - 0.8 МПа четко выделялись две стадии: (1) быстрое дробление пористого материала, и (2) более медленный процесс их выброса в область низкого давления. Процесс дробления материала распространяется от свободной поверхности, подвергаемой декомпрессии, вглубь образца путем последовательного отрыва слоев материала. Скорость фрагментации составляет около 40 м/с и возрастает при увеличении начального перепада давления. Максимальная скорость выброса фрагментов, достигающая ~ 60 м/с, также зависит от начального перепада давления. Процесс выброса фрагментов носит нестационарный характер. Выброс смеси газа с фрагментами чередуется с выбросом порции газа. В качестве реальных образцов магмы использовались образцы пористого дацита вулкана Сент-Хеленс. Эксперименты проводились при температуре 15 - 915 °С. Пороговые величины перепада давления, вызывающие фрагментацию, снижаются с 9 до 3 МПа при возрастании температуры от 15 °С до 900 °С. Промежуток времени между началом декомпрессии и началом фрагментации верхнего торца образца находился в диапазоне 0.5 - 2.0 мс и уменьшался при увеличении начального перепада давления. При минимальном перепаде давления, вызывающем фрагментацию образцов дацита, их разрушение происходило в основном на крупные куски. Скорость фрагментации, оцененная таким образом, оказалась в диапазоне ~ 5 - 170 м/с. Процесс выброса носит ярко выраженный пульсирующий характер. За порцией смеси газа с частицами следует порция практически чистого газа, за которой снова следует порция двухфазной смеси. Такие порции наблюдались через промежутки времени 2-8 мс. Скорость выброса составляет около 100 м/с и зависит, от начального перепада давления [\[35\]](#).

Предложенный М.А. Алидибировым механизм взрыва и фрагментации газонасыщенного материала подтверждается материалами лабораторного моделирования других исследователей [\[36, 37\]](#). На рис. 21 показаны процессы фрагментации и выброса образца пластипрена (малопрочный высокопористый теплоизоляционный материал, созданного на основе фенолформальдегидной смолы). Сжатый воздух, насыщал образец, находящийся в герметичном контейнере. После резкого снятия давления и появления растягивающих напряжений в твердом скелете пористого материала формируется последовательно увеличивающаяся сеть горизонтально ориентированных пор, микро- и макротрешин, последовательно проникающих вглубь материала. Градиент давления в газовой составляющей и связанный с ним фильтрационный поток играют основную роль в разрушении пористого материала, у которого большая часть пор соединяется, обеспечивая материалу проницаемость. Разрушение происходит во фронте волны разрежения, распространяющейся по газу в порах. Скорость этой волны и размер обломков зависят при прочих равных условиях от скорости декомпрессии: при более быстром спаде давления на границе скорость волны больше, а размер обломков меньше [\[38\]](#).

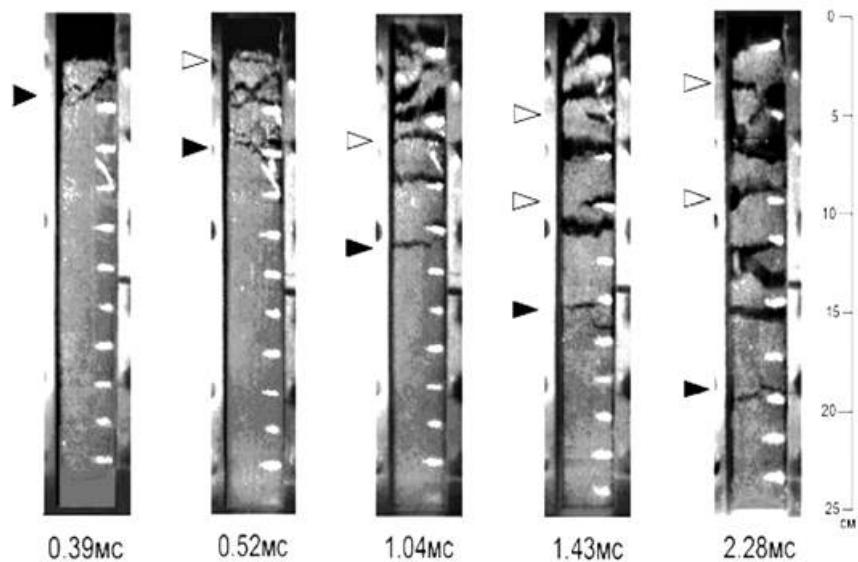


Рис. 21. Кадры кинограммы разрушения модельного материала. Чёрные стрелки — первичные трещины, серые — вторичные [\[38\]](#)

Мы считаем, что предложенный М. А. Алидибировым механизм выброса вязких и даже застывших газонасыщенных магм, позволяет глубже понять особенности подготовки и протекания взрывных процессов, связанных с возникновением и развитием локальных газонасыщенных зон в мёрзлых породах. Использование данного механизма в качестве аналога, несомненно, ускорит разработку и теоретическое обоснование модели формирования воронок газового выброса. Исходя из рассмотренной выше модели, можно предложить общую схему последовательности событий, связанных с пневматическим взрывом. Перед взрывом объём будущей воронки газового выброса, заполняет газонасыщенный деформированный ледогрунт, обладающий запасом потенциальной энергии сжатых газов. Давление газа деформирует грунты перекрывающей мёрзлой кровли, формируя бугор пучения. При достижении давления значений, превышающих её прочностные параметры, мёрзлая кровля разрушается, что является первой стадией пневматического взрыва. На данной стадии происходит выброс крупных блоков мёрзлых грунтов, формирующих вал, обрамляющий образовавшийся кратер. При этом происходит резкий сброс давления от существовавшего в газонасыщенной зоне до атмосферного. После этого начинается вторая стадия пневматического взрыва. В верхних слоях газонасыщенного ледогрунтового штока начинается фрагментация мёрзлого массива и выброс материала под воздействием давления газа насыщающего ледогрунтовый шток. Формируется фронт декомпрессии, последовательно сдвигающийся вглубь, в котором происходит дробление и выброс обломков на поверхность. Размеры обломков резко уменьшаются, а расстояния, на которое они выбрасываются, достигают несколько сотен метров.

Распределение выброшенного ледогрунтового материала

Распределение выброшенных на поверхность обломков мёрзлых пород и льдов по отношению к воронке соответствует рассмотренной выше стадийности взрывного процесса. На первой стадии движущей силой является сжатый газ, скопившийся под мёрзлой кровлей. Ему соответствует бруствер из крупных блоков мёрзлой породы. На второй стадии движущей силой является газ, выделившийся при последовательной фрагментации газонасыщенного ледогрунтового штока. Рассмотрим некоторые общие

закономерности распределения ледогрунтовых блоков вокруг воронки газового выброса на конкретных примерах.

На рис. показаны особенности разброса ледогрунтовых блоков вокруг Дерябинской воронки, расположенной на юго-западном побережье Енисейского залива. Глубина воронки около 60 м (рис. 22).



Рис. 22. Обломки, разбросанные вокруг Дерябинской воронки.

Фото Станислава Яптуне

На заднем плане бруствер, сформированный крупными ледогрунтовыми и ледяными блоками вокруг воронки глубиной около 60 м. В непосредственной близости от воронки размеры обломков мёрзлой породы и льда достигают размеров до 3x5 м. На переднем плане более широкая зона, в которой рассеяны мелкие блоки размером в десятки сантиметров. Ямальский кратер обрамляет бруствер шириной 20 м, далее на расстояние 120 м распространена территория с мелкими обломками [39] Сеяхинская воронка, расположенная на восточном побережье полуострова Ямал в пойме реки Морды-Яха. Глубина воронки более 65 м. Вокруг воронки формируется бруствер на удалении от центра кратера до 50–95 м. размеры отдельных ледогрунтовых блоков в этой зоне достигают размера 4x8x10 м. Общий разлёт обломков прослеживается на расстоянии до 370 м. размеры обломков резко уменьшаются [40]. За пределами бруствера размеры блоков резко уменьшаются. Общее распределение обломков по отношению к воронке показано на рис. 23.

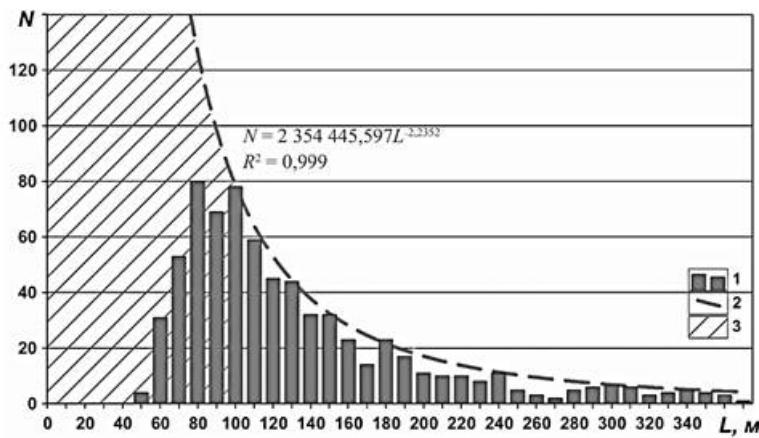


Рис. 23. Распределение количества кусков выброшенной породы и льда N в зависимости от расстояния до центра кратера L . Обозначения: 1 — N , 2 — линия аппроксимации $N(L)$, 3 — зона сплошного поражения (L до 95 м) [\[41\]](#)

6. Обсуждение

Рассмотренные выше примеры процессов, аналогичных наблюдавшихся в воронках газового выброса, взяты из различных отраслей знания о Земле, строительной практики, лабораторного моделирования. Все они являются аналогами процессов, формирующих отдельные элементы криогенного строения воронок. Широкое применение метода аналогий обусловлено слабой разработанностью данных тем в области изучения мёрзлых пород. Несомненно, применение данного метода позволяет глубже понять развитие отдельных процессов и связанных с ним образований, в нашем случае криогенных. При этом следует отметить, что рассмотренные аналогии не в полной мере соответствуют рассматриваемым криогенным объектам. Например, ни в одном рассмотренном примере не реализуются фазовые переходы, хотя они во многом определяют перестройку криогенного строения мёрзлых грунтов, в зонах сдвиговых деформаций. Кроме того, изменения в мёрзлом грунтовом массиве, приводящие к пневматическим взрывам, не сводятся к реализации отдельных процессов. Их взаимодействие под направленным влиянием повышенного давления внутригрунтового газа приводит к формированию парагенезов криогенных образований, характерных только для воронок газового выброса, таких как кольцевые структуры и сотовые льды. Возникновение начальных условий для подготовки пневматических взрывов обуславливаются взаимодействием нескольких факторов: повышенное содержание газа в локальных зонах мёрзлых грунтов, высокое пластовое давление газа в них, наличие газонепроницаемой мёрзлой кровли. Объединённое взаимодействие данных факторов является причиной возникновения и первой стадией развития локальных криогенных газодинамических геосистем.

Криогенная газодинамическая геосистема представляет из себя локальную зону в массиве многолетнемёрзлых грунтов, характеризующуюся повышенным, относительно фоновых значений, содержанием газа, с аномально высоким пластовым давлением. Данная геосистема имеет ряд характеристик, отличающихся от вмещающих мёрзлых грунтов: чётко выраженные границы, структуру, отражающую динамическое взаимодействие газовой и криогенной составляющих; специфическое криогенное строение; историю развития, включающую все стадии подготовки пневматического выброса и фиксирующаяся в смене парагенезов криогенных образований.

Вне зависимости от генезиса газа, а также причин его локализации и формирования аномально высокого пластового давления, воронки газового выброса являются конечным результатом развития локальной газодинамической геосистемы, сформированной в толще многолетнемёрзлых пород. Все они имеют трехчленное строение, поскольку оно отражает общую для них последовательность событий. Прежде всего, это формирование первичной газонасыщенной зоны с аномально высоким давлением. Данная зона располагается в нижней, расширенной части воронок газового выброса. Средняя, сужающаяся часть, или зоны транзита, формируется при деформации локального участка газонасыщенной зоны и поступление газа вверх, в зону будущего пневматического взрыва. Третьим элементом газодинамической геосистемы, является непосредственно зона взрывного выброса газа. Она соответствует верхней расширенной части воронок газового выброса. Газ по транзитной зоне проникает в вышележащие мёрзлые грунты, увеличивая пластовое давление до тех пор, пока оно не превысит их прочность. После этого происходит пневматический взрыв.

Разнообразие геологических и геокриологических условий, различие пластовых давлений газа и динамики газодинамических процессов будет проявляться в строении данных зон, их морфологии и размерах. При этом трехчленность строения сохраняется.

Рассмотрим данное положение на примере зоны транзита двух воронок газового выброса (Ямальского кратера и воронки Осокина), обнаруженных на полуострове Ямал [1,2]. В Ямальском кратере, сложенном льдистыми суглинками и льдами. Залегающая в её основании газонасыщенная зона располагается на глубине более 60 метров, Развитие локальной газодинамической криогенной геосистемы до момента взрыва продолжалось несколько десятков лет. Зона транзита представляет собой цилиндр с вертикальными стенками высотой более 20м. В тех случаях, когда газонасыщенные зоны формируются близко к поверхности, а покровные толщи представлено песками или льдами (воронка Осокина глубина около 20 м) вертикальные размеры сужающейся транзитной зоны составляют несколько десятков сантиметров. Сама транзитная зона имеет форму овала с неровными границами. В данном случае наблюдается быстрый рост давления в газонасыщенной зоне до значений, превосходящих прочность кровли. После чего следует пневматический взрыв с формированием расширенной части воронки.

С момента обнаружения воронок газового выброса и до настоящего времени основным вопросом интересующим большинство исследователей является происхождение газа. Несомненно, это интересная и важная проблема. Но если предположить, что она решена. Это могут быть глубинные подмерзлотные газы, или поверхностные биогенные, локализованные при эпигенетическом промерзании, или внутримерзлотные, выделившиеся при разложении газогидратов. Будут ли после этого выявлены условия и процессы, подготавливающие пневматические выбросы в мёрзлых породах. Можно с уверенностью утверждать, не будут. Связано это, прежде всего, с тем, что формированию воронок предшествует серия взаимодействующих комплексов криогенных процессов и соответствующих им криогенных образований. Разнообразие их строения определяется парагенетическими связями между процессами фазовых переходов, фильтрации газа и деформации газонасыщенного ледогрунтового материала (от вязкопластического движения до хрупкого разрушения).

Предварительно можно выделить несколько таких комплексов:

- процессы, связанные с фильтрацией и перераспределением газа в мёрзлых породах;
- процессы, связанные с деформацией мёрзлых пород под напорным воздействием газа;

- процессы, связанные движение ледогрунтовых блоков с массиве мёрзлых пород.

Все выделенные группы процессов связаны, в той или иной мере, с перекристаллизацией льда, сдвиговыми деформациями и сопутствующей миграцией связанной воды из наряжённых участков мерзлых массивов в менее напряжённые, а также с пластическими и разрывными деформациями мёрзлых пород и льдов, режеяцией и течением льда, перестройкой криотекстур в соответствие с возникающими напряжениями. Анализ криогенного строения мёрзлых пород, слагающих образовавшиеся воронки, позволяет перейти от гипотетических построений к анализу реальных событий, обуславливающих последовательность механизмов, подготовки пневматических выбросов. Совокупность процессов, формирующих газонасыщенные зоны и воронки газового выброса, следует относить к криогенным, поскольку они обусловлены прочностными и деформационными свойствами мёрзлых грунтов, деформациями первичного криогенного строения, режеяцией и течением льда, формирование новых криогенных образований, фазовыми переходами в промерзающих и мёрзлых породах, их структурно-текстурными особенностями и массообменными процессами. Успешное изучение данных процессов может быть проведено только при расширении традиционных представлений в геокриологии с включением в них положений, разработанных в рамках геологии, гляциологии, тектоники, вулканологии. При всей важности мерзлотных исследований при изучении воронок газового выброса, в настоящее время они, в должной мере, не проводятся.

7. Заключение

Воронки газового выброса следует относить к криогенным явлениям. Они являются объектом геокриологических исследований и должны быть включены в комплекс теоретических и прикладных построений геокриологии.

Формирование данных объектов реализуется, как конечная фаза развития локальных газодинамических геосистем в мёрзлых породах. Ведущим фактором в развитии данных геосистем, от момента зарождения (возникновение внутргрунтовой зоны с аномально высоким давлением газа) до конечной стадии пневматического взрыва, является повышенное давление внутргрунтового газа, определяющее смену парагенетических комплексов криогенных процессов.

Изучение криогенного строения воронок газового выброса показало, что существующие теоретические представления, при исследовании процессов, происходящих в уже сформированных мёрзлых породах, нуждаются в доработке и переосмыслении. Перечислим некоторые темы, выявившиеся при изучении воронок газового выброса и требующие дополнительных исследований:

- изучение движения локальных объёмов грунта в массиве мёрзлых пород в естественных условиях;
- разработки теории фильтрации газа в подземных льдах и многолетнемёрзлых грунтах;
- разработки теоретической модели развития локальной газодинамической геосистемы в толще многолетнемёрзлых грунтов, приводящей к пневматическому выбросу;
- изучения закономерностей смены комплексов парагенезов криогенных процессов и соответствующих криогенных образований на различных стадиях развития локальных газодинамических геосистем в многолетнемёрзлых грунтах;

- разработки геомеханической модели подготовки взрывных процессов в толще многолетнемёрзлых грунтов;
- разработки теории возникновения газовых полостей с высоким давлением в многолетнемёрзлых грунтах;
- разработки методики выявление поверхностных, внутримерзлотных и глубинных условий формирования локальных газонасыщенных зон в толще многолетнемёрзлых грунтов;
- разработки методики выявления локальных скоплений подземного газа находящегося под избыточным давлением;
- разработки методики выявление бугров пучения с высоким содержанием газа и аномально высокими скоростями роста.

Библиография

1. Хименков А. Н., Станиловская Ю. В. Воронки газового выброса, как объект геокриологии. Часть 1 // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. С. 1-14.
2. Хименков А. Н., Станиловская Ю. В. Воронки газового выброса, как объект геокриологии. Часть 2. Кольцевые структуры, сотовые льды // Арктика и Антарктика. 2025. № 3. С. 1-13.
3. Moss J.L., Cartwright J. 3D seismic expression of km/scale fluid escape pipes from offshore Namibia // Basin Research. 2010. Vol. 22. No. 4. P. 481-501. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2010.00461.x. EDN: MYVQHJ.
4. Cartwright J., Santamarina C. Seismic characteristics of fluid escape pipes in sedimentary basins: Implications for pipe genesis // Marine and Petroleum Geology. 2015. Vol. 65. P. 126-140. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2015.03.023. EDN: UVHWDL.
5. Рыбак Е.Н., Ступина Л.В. Покмарки Черного моря // Геологія і корисні копалини Світового океану. 2019. Т. 15. №. 2. С. 16-34. DOI: 10.15407/gpimo2019.01.016. EDN: VDDNQT.
6. Щёлокова Д.В. Нетрадиционные углеводороды как источник неисчерпаемости топливно-энергетических ресурсов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. №. 1. С. 120-126. EDN: VZYTJV.
7. Shiyun Lei, Xiujun Guo, Haoru Tang. Experiment and analysis of the formation, expansion and dissipation of gasbag in fine sediments based on pore water pressure survey // Acta Oceanologica Sinica. 2022. Vol. 41. No. 4. P. 91-100. DOI: 10.1007/s13131-021-1851-x. EDN: RXUXAS.
8. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Дернова Е.О. Газонасыщенные мёрзлые породы, как объект изучения геокриологии // Арктика и Антарктика. 2023. № 1. С. 26-64. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.1.40378 EDN: PLNGUD URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=40378
9. Арэ Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли. 1998. Т. II. №. 4. С. 42-50.
10. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Том 2:

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

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

12. Bull J.M., Berndt C., Minshull T.A. et al. Constraining the physical properties of chimney/pipe structures within sedimentary basins. 14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-14. 21st–25th October 2018, Melbourne, Australia. 2018.

13. Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. Взрывные процессы в области распространения многолетнемерзлых пород - новый вид геокриологической опасности // Геоэкология. 2019. №. 6. С. 30-41. DOI: 10.31857/S0869-78092019630-41. EDN: JRXQRV.

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

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

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

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

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

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

20. Стриха В.Е. Методическое пособие по дисциплине "Структурная геология", краткий курс лекций: учебное пособие. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2012. 152 с.

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

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

23. Хилимонюк В.З., Оспенников Е.Н., Булдович С.Н., Гунар А.Ю., Горшков Е.И. Геокриологические условия территории расположения Ямальского кратера // V конференция геокриологов России. М.: Издательство Московского университета, 2016. Т. 2. С. 245-255.

24. Supplementary Materials for Cryovolcanism on the Earth: the Origin of the Spectacular Crater on Yamal Peninsula (Russia) S.N. Buldovicz et al. // Scientific reports. 2018. Vol. 8. DOI: 10.1038/s41598-018-31858-9.

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

26. Лейбман М.О., Кизяков А.И. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа. 2016. № 2. С. 15-24.

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

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

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

2010. 272 р.

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

31. Гумеров А.Г., Гумеров Р.С., Гумеров К.М. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов. М.: Недра-Бизнесцентр, 2003. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Издво СО РАН, 2000. EDN: FKQBVK.

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

33. Вольфсон Ф.И., Яковлев П.Д. Структуры рудных полей и месторождений. Недра, Москва, 1975. 248 с.

34. Горная энциклопедия. Т. 5. Советская энциклопедия, Москва, 1991. 435 с.

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

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

37. Панов В.К. Применение линейной теории нестационарной фильтрации для анализа экспериментов по разрушению пористого газонасыщенного материала // Вестник краунц. науки о Земле. 2009. № 1. Вып. № 13. С. 89-97. EDN: KTZSYN.

38. Панов В.К. Экспериментальное моделирование процессов при извержении типа "направленный взрыв" // Проблемы эксплозивного вулканизма. Материалы международного симпозиума. Петропавловск-Камчатский, 25-30 марта. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006. С. 49-57.

39. Лейбман М.О., Плеханов А.В. Ямальская воронка газового выброса // Холод'ОК. 2014. № 2(12). С. 9-15.

40. Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Nikonorov R., Kishankov A. Complex of Geophysical Studies of the Seyakha Catastrophic Gas Blowout Crater on the Yamal Peninsula, Russian Arctic // Geosciences. 2020. Vol. 10. P. 215.

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

Результаты процедуры рецензирования статьи

Рецензия выполнена специалистами [Национального Института Научного Рецензирования](#) по заказу ООО "НБ-Медиа".

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

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

Предметом исследования являются воронки газового выброса, как объект геокриологии. Предлагаем в названии статьи убрать словосочетание «Часть 3». Тема исследований актуальна для более полного понимания процессов, происходящих в воронках газового выброса. Первопричиной формирования всех воронок газового выброса является формирование локальных газонасыщенных зон с повышенным давлением. Напорное воздействие газов на перекрывающие мёрзлые грунты, являясь ведущим фактором, обусловило общую направленность и последовательность стадий развития локальных газодинамических геосистем с соответствующими парагенезами

криогенных процессов и криогенных образований, обнаруженных в различных воронках.

Методология исследования. На начальном этапе разработки темы автор использовал метод аналогий, изучая примеры сходных динамических условий и соответствующих им образований, из других областей наук о Земле.

Автор в статье указывает на полное отсутствие в настоящее время теоретических разработок, касающихся напорного воздействия внутргрунтовых газов на мёрзлые породы. Это обуславливает новизну данного исследования.

Стиль статьи соответствует научной монографии. Структура данной статьи не соответствует требованиям журнала «Арктика и Антарктика». Для этого в ней нужно отразить актуальность, новизну, условия и методы исследований, результаты и их обсуждения и заключение.

В рецензируемой статье выделены следующие разделы: Введение, Обсуждение, Нижняя расширенная часть воронки, Газовые полости связанные с пневморазрывом грунтовой толщи, Мёрзлые газонасыщенные грунты, Средняя сужающаяся часть воронки, Кольцевые структуры, Зона ячеистого льда в Ямальском кратере, Формирование газонасыщенного ледогрунтового штока, Особенности выброса материала внутри воронки, Распределение выброшенного ледогрунтового материала, Заключение, Библиография.

Такое количество разделов относит данный материал статьи к обзорно-аналитическому. Желательно автору представить результаты собственных исследований в данной статье, это улучшит ее качество.

В тексте есть опечатки, требуется дополнительная редакция текста.

Библиография статьи включает в себя 62 литературных источника. Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на литературные источники.

В выводах статьи отмечено, что воронки газового выброса следует относить к криогенным явлениям. Они являются объектом геокриологических исследований и должны быть включены в комплекс теоретических и прикладных построений геокриологии. Формирование данных объектов реализуется, как конечная фаза развития локальных газодинамических геосистем в мёрзлых породах. Ведущим фактором в развитии данных геосистем, от момента зарождения (возникновение внутргрунтовой зоны с аномально высоким давлением газа) до конечной стадии пневматического взрыва, является повышенное давление внутргрунтового газа, определяющее смену парагенетических комплексов криогенных процессов.

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

Результаты процедуры повторного рецензирования статьи

Рецензия выполнена специалистами [Национального Института Научного Рецензирования](#) по заказу ООО "НБ-Медиа".

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

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

Предмет исследования являются, по утверждению автора, являются видео и фото изображения криогенных образований, сделанных в воронках газового выброса,

обнаруженных к настоящему времени, и представленных в научных публикациях различных изданий совместно с проведенными лабораторными исследованиями возможности фильтрации газа в мёрзлых грунтах.

Методология исследования исходя из анализа статьи можно сделать вывод о том, что основным методом, используемым автором статьи, является анализ фото и видео материалов, фиксирующих различные элементы криогенного строения воронок газового выброса, приведённых в различных открытых источниках, синтез которых осуществлялся на базе геосистемного подхода. Вследствие слабой разработанности рассматриваемой темы, и незначительного объёма исходных фактических материалов был использован метод аналогий с привлечением материалов из различных областей наук о Земле, строительства, инженерной геологии и др. При изучении возможности насыщения газом мёрзлых грунтов использовался метод лабораторного моделирования. Автором также использовался метод литературного анализа, сравнительных характеристик объектов и процессов алгоритмического и математического моделирования.

Актуальность затронутой темы связано с тем, что исследование, обнаружение и изучение воронок газового выброса на севере Западной Сибири заставило обратить внимание на проблему газодинамических процессов в многолетнемёрзлых грунтах, которая до этого не рассматривалась. Наибольшие трудности в понимании развития газодинамических геосистем, приводящих к появлению воронок газового выброса, является полное отсутствие теоретических разработок, касающихся напорного воздействия внутргрунтовых газов на мёрзлые породы. Являясь объектом геокриологических исследований, они должны быть включены в комплекс теоретических и прикладных построений геокриологии.

Научная новизна заключается в том, что автор статьи на основе проведенных исследований по сопоставлению результатов анализа образцов рассмотрел вопросы, связанные с изучением напорных процессов в многолетнемёрзлых грунтах осуществляется посредством анализа строения криогенных структур, ранее в научной литературе не использовался. Практически не изучены слоистые ледогрунтовые структуры, в том числе и кольцевые, формирующиеся при сдвиговых деформациях, и смещении блоков мёрзлых пород относительно друг друга. Новым является и анализ строения и разработка гипотезы формирования сотовых льдов, уникальных криогенных образований, формирующихся при газодинамических процессах в многолетнемёрзлых грунтах. Впервые предложена гипотеза стадийного взрывного процесса при формировании воронок газового выброса

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, фотографии, рисунки, таблицы и графики иллюстративны уместны.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса.

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

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