

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

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

## Воронки газового выброса как объект геоэкологии (Часть 1)

**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](mailto:a_khimenkov@mail.ru)



**Станиловская Юлия Викторовна**

Специалист по взаимодействию инфраструктуры и мёрзлых пород, Тоталь

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

✉ [e-mailjulia.stanilovskaya@total.com](mailto:e-mailjulia.stanilovskaya@total.com)



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

### DOI:

10.7256/2453-8922.2025.2.73816

### EDN:

RTLODK

### Дата направления статьи в редакцию:

24-03-2025

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

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

**Ключевые слова:**

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

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

**Введение**

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

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

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

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

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

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

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

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

### Морфология воронок газового выброса

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

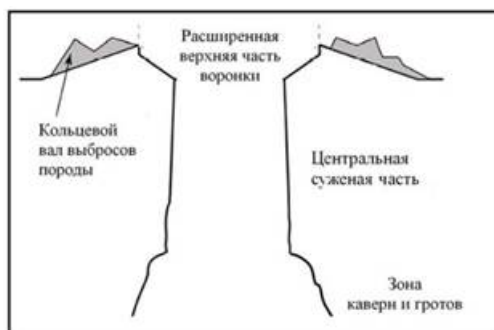


Рис. 1. Обобщённая схема строения воронок газового выброса

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

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

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

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

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

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



Рис. 2. Принципиальная схема строения Ямальского кратера

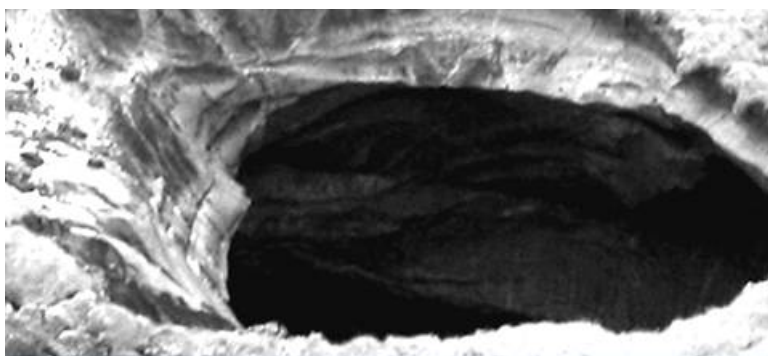
1 – вода озера на дне кратера [\[14\]](#)

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

Фото А. Б. Осокина

В большинстве обследованных воронок строение стенок близко к 1 типу.

### **Криогенное строение нижней расширенной части воронки газового выброса**

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



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

деформации и течение ледогрунта Фото М. Лапсуя

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

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



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



Рис. 5. Деформации в расширенной нижней части воронки газового

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

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

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



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

Фото М. О. Лейбман

### **Газовая составляющая криогенного строения**

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



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





Рис. 8. Связь «газовых лент» грота с ячеистыми образованиями  
на вертикальных стенках суженной части Ямальского кратера  
ноябрь 2014 (фото В.А. Пушкарёва)

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

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



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

Фотография П. Соболева

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

### **Криогенное строение средней (сужающейся) части**

#### **воронки газового выброса**

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

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

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



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

Фото В.В. Оленченко

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



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

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

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

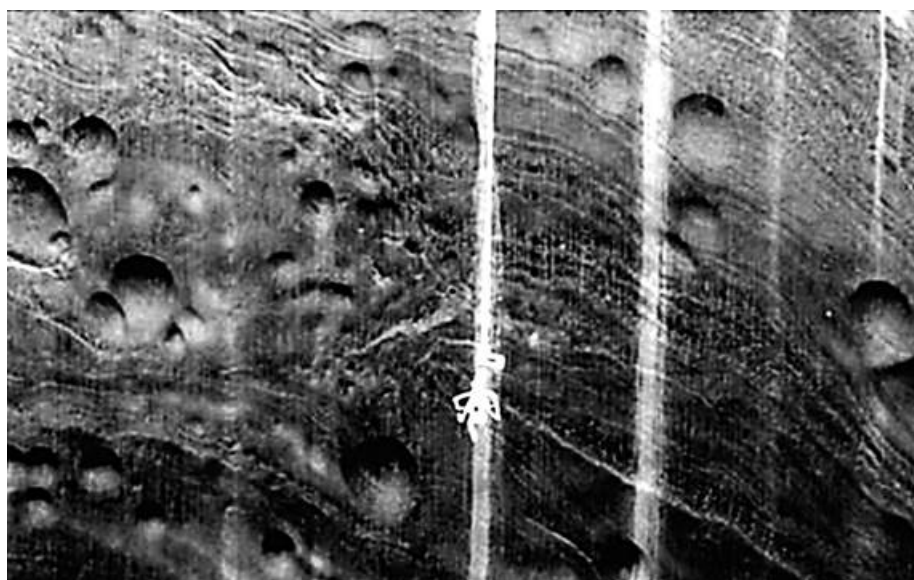


Рис. 12. Обтекание изометричных блоков газонасыщенного льда слоистым ледогрунтом.

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

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



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

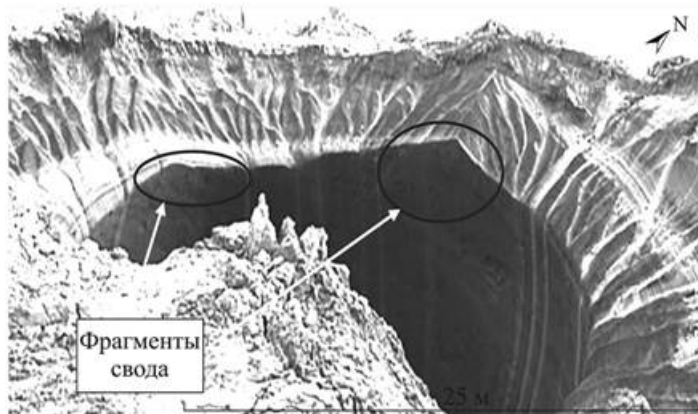


Рис. 13. Ямальский кратер. Остатки свода над газонасыщенной зоной, сохранившиеся после выброса. Июль 2014 г. Фото В.А. Пушкарева

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



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

Фото В. И. Богоявленского [20]

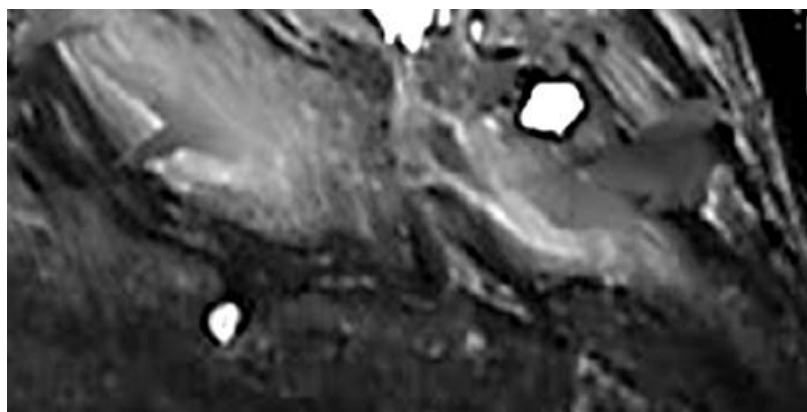


Рис. 15. Фрагмент рис. Пластические деформации  
мерзлых пород верхней части воронки

### **Заключение**

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

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

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

### **Библиография**

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



(59). С. 14-23. EDN: SYRRRB.

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

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

7. Buldovich S. N. и др. Cryovolcanism on the earth: Origin of a spectacular crater in the Yamal peninsula (Russia) // Scientific reports. 2018. Vol. 8. DOI: 10.1038/s41598-018-31858-9. EDN: VBFJYO.

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

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

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

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

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

13. Хименков А.Н., Станиловская Ю.В. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера. // Арктика и Антарктика. 2018. № 3. С. 1-25. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27524 URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=27524](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=27524)

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

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

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

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

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

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

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

320-333. EDN: FCBZYH.

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

22. Блог "Мир вокруг: разное", 2017. На Ямале обнаружили новую воронку в земле. Дата обращения: 15.04.2021. URL: [http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blogpost\\_9.html](http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blogpost_9.html).

Официальный сайт RT, 2015. Тайна Ямальского кратера: корреспондент RT попытался разгадать загадку сибирских воронок. Дата обращения: 15.04.2021. URL: <https://russian.rt.com/article/105424>.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

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

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

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

Методология исследования автором не представлена в статье, ее желательно более

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

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

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

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

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