

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Хименков А.Н., Кошурников А.В., Станиловская Ю.В. — Парагенезы криогенных образований воронок газового выброса (2 Часть). Криогенный фактор в формировании воронок газового выброса // Арктика и Антарктика. – 2021. – № 3. DOI: 10.7256/2453-8922.2021.3.35505 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=35505

Парагенезы криогенных образований воронок газового выброса (2 Часть). Криогенный фактор в формировании воронок газового выброса

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



Кошурников Андрей Викторович

кандидат геолого-минералогических наук

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

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

✉ msu-geophysics@mail.ru



Станиловская Юлия Викторовна

Специалист по взаимодействию инфраструктуры и мёрзлых пород, Тоталь

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

✉ e-mailjulia.stanilovskaya@total.com



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

DOI:

10.7256/2453-8922.2021.3.35505

Дата направления статьи в редакцию:

14-04-2021

Аннотация: Предметом исследования являются мёрзлые породы, слагающие воронки газового выброса на севере Западной Сибири. Объектом исследования является криогенный фактор, обуславливающий формирование воронок газового выброса. Авторы указывают и обосновывают тезис, что воронки газового выброса являются криогенным феноменом и процессы подготавливающие взрыв не могут быть правильно

осмыслены без учёта этих особенностей. Тепловые потоки, преобразования среды под действием давлений, фильтрация газа и другие процессы реализуются в мёрзлых породах, и проявляются в их структурных изменениях. Анализ материалов исследования воронок газового выброса, обнаруженных на севере Западной Сибири, позволил сделать обоснованный вывод, что поверхностные условия могут оказывать значительное влияние на формирование воронок газового выброса. Приводятся материалы, показывающие, что причиной возникновения высоких давлений в мёрзлой толще может являться разложение газогидратов. В статье особое внимание уделено рассмотрению гипотезы формирования воронок газового выброса за счёт локального прогрева и подачи газа с глубины. Показаны необходимые условия для этого. Приведены примеры использования геофизических методов для выделения газоподводящих каналов. В результате проведённого исследования делается вывод о том, что воронки газового выброса являются результатом саморазвития флюидодинамических геосистем, представляющих из себя локальные, ледогрунтовые газонасыщенные образования, находящиеся в неравновесном термодинамическом состоянии по отношению к вмещающим многолетнемёрзлым породам. Развитие выделенных геосистем определяется парагенетическими связями между процессами фильтрации газа и деформаций газонасыщенного ледогрунтового материала (от вязкопластического движения до хрупкого разрушения). Особым вкладом авторов в исследование темы является рассмотрение поверхностных и глубинных механизмов возникновения неравновесных условий запускающих механизм подготовки взрыва. Новизна исследования заключается в разработке методики выявления процессов, обуславливающих выброс подземного газа, на основе анализа криогенных образований слагающих стенки воронок газового выброса.

Ключевые слова: многолетнемёрзлые породы, пластические деформации, тепловой поток, диссоциация газогидратов, фильтрация газа, газовые флюиды, флюидогеодинамика, ледогрунтовые газонасыщенные геосистемы, стадии развития, парагенетические связи

Введение

Во второй части статьи рассмотрены парагенезы процессов и образований, приуроченных в краевым частям газонасыщенных ледогрунтовых геосистем (кольцевые структуры и пластические деформации поверхностных слоёв мёрзлых пород), формирующих воронки газового выброса. Обосновывается положение, что основой этих процессов является криогенный фактор. Тепловые потоки, преобразования среды под действием давлений, фильтрация газа и другие процессы реализуются в мёрзлых породах, и проявляются в их структурных изменениях. Анализ материалов исследования воронок газового выброса, обнаруженных на севере Западной Сибири, позволил сделать вывод, что поверхностные условия могут оказывать значительное влияние на формирование воронок газового выброса. Приводятся материалы, показывающие, что причиной возникновения высоких давлений в мёрзлой толще может являться разложение газогидратов. Показано, что имеющиеся в настоящее время данные могут использоваться для обоснования, как поверхностных, так и глубинных механизмов возникновения неравновесных условий запускающих механизм подготовки взрыва.

Кольцевые структуры приуроченные к стенкам воронок газового выброса

Одними из самых необычных образований в воронках газового выброса являются

кольцевые структуры. Они формируют стенки воронок и представляют из себя слоистые вертикально ориентированные образования, состоящие из чередующихся слоёв чистого льда и ледогрунта, или серии концентрических трещин. В горизонтальном срезе они образуют кольцевые структуры толщиной от нескольких десятков сантиметров до 1-2 м.

В Ямальском кратере (GEC-1) кольцевая структура (рис. 2.1) [1,2] состоит из переслаивания слоёв льда толщиной 0,5 – 2,5 см с минеральными слоями толщиной 0,2 – 1 см [3]. На рис. 2.2. изображена слоистость льда в стенке кратера в месте перегиба от воронкообразной верхней части к вертикальной цилиндрической.

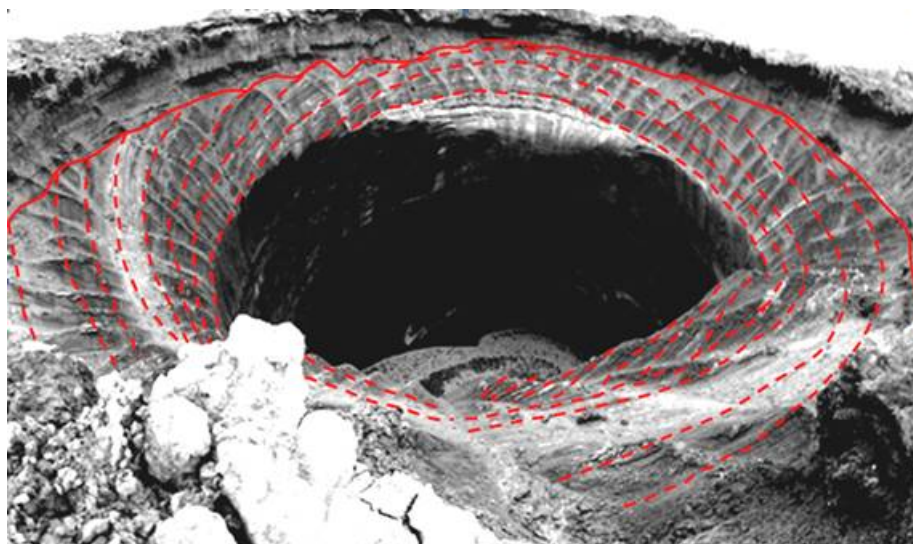


Рис. 2.1. Кольцевая структура, облегающая Ямальский кратер. Штриховкой обозначено направление субвертикальных слоёв в зоне, прилегающей к стенкам кратера, сплошной линией нижняя граница деятельного слоя. Фото В. В. Оленченко,



Рис. 2.2. Субвертикальная слоистость льда окаймляющего Ямальский кратер. Июль 2014. Скриншот видео.

[4]

Образцы слоистого льда, отобранные и проанализированные Э.И. Галеевой с соавторами [5], показали, что слоистость обусловлена вязкопластическим течением льда. Деформации сдвига приводят к деформации льда пластовой залежи, формированию вертикального штока с многочисленными складками, вторичной слоистости (кливажа) ориентированной под углом до 60° к горизонтально залегающей первичной слоистости. Изучение структуры слоистого льда Ямальского кратера показала чёткое деление льда на слои толщиной около 1,5 см, Кристаллы в слоях удлинённые, ориентированы длиной

стороной в направлении общей слоистости (рис. 2.3). Во льду наблюдаются включения мелких пузырьков газа диаметром около 0,01 см расположенных хаотично или параллельно включениям. [5].

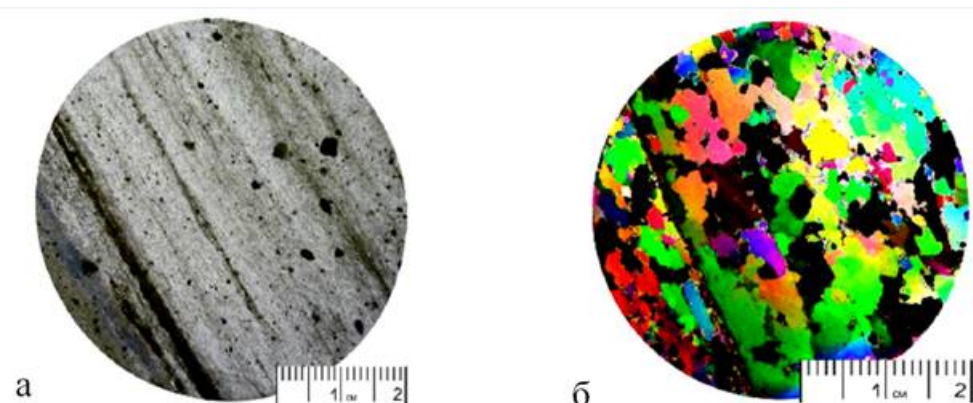


Рис. 2.3. Лёд из воронки газового выброса (Ямальский кратер) [5].

Оставшийся после взрыва, и доступный для изучения, слой слоистого ледогрунта, формирующий стенки Ямальского кратера, имеет небольшую мощность (первые метры). Если в 2014 году данный слой прослеживается на всей поверхности, то к середине лета 2015г он практически полностью оттаял.

Аналогичная кольцевая структура наблюдается в Антипаютинской воронке газового выброса (AntGEC) обнаруженной на на юго-западе Гыданскийого п-ва (рис. 2.4). Судя по морфологии газовых включений (вытянутые и изометричные, крупные, сплюснутые, с извилистыми границами), стенки испытывали значительное давление со стороны центральной части при одновременном смещении вверх. В результате сформировалась кольцевая зона с вертикально ориентированной слоистостью (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Кольцевая структура вокруг Антипаютинской воронки. Фото Михаила Лапсуя

В краевой части Еркутинской (ErkGEC) воронки наблюдается локальная зона деформированного льда. Здесь слои льда, выгнутые вверх, образуют кольцевую структуру (рис. 2.5). Над ней расположена зона перемятых обожжённых пород.



Рис. 2.5. Еркутинская воронка. Кольцевая структура, состоящая из вертикально ориентированных трещин. Скриншот видео А. Соколова [\[6\]](#)

В обнаруженной в 2020 г. воронке, также наблюдается субвертикальная слоистость льда, образующая кольцевую структуру на контакте с вмещающей глинистой толщей (рис. 2.6а), аналогичную подобным образованиям в других воронках. На рис. 2. 6б. хорошо видна вертикальная ориентировка ледяных слоёв, близкая по строению кольцевой структуре Ямальского кратера (рис. 1.10). Толщина кольцевой структуры обнаруженной в 2020г воронки небольшая и составляет первые десятки сантиметров.

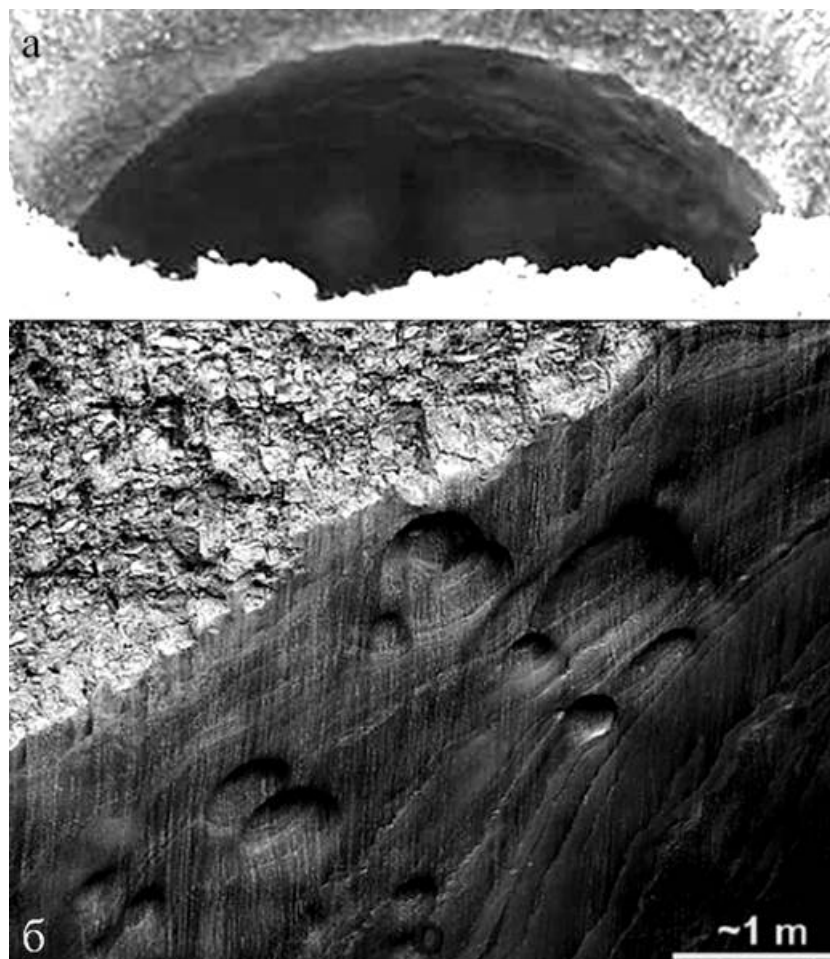


Рис. 2.6. Кольцевая структура в воронке обнаруженной в 2020 г. фото А. Умникова от 16 июля 2020г. а – общий вид; б - фрагмент кольцевой структуры. Фото Евгения Чувилена [7]

В лабораторных экспериментах подобные кольцевые структуры были получены при продавливании штампа сквозь слой глины. В условиях сдвига в контактной зоне формируется система разрывов или трещин скалывания (рис. 2.7). Преимущественное развитие получают трещины ориентированные под углом от 15 до 20° к генеральному сдвигу [8]. В случае воронок газового выброса возникает система длинных густо расположенных субвертикальных сколов и трещин образующих кольцевую структуру.



Рис. 2.7. Осепродольные разрывы при давлении штампа снизу вверх. [8]

Проведённые В. И. Соломатиным эксперименты, в которых на массив льда оказывалось локальное ориентированное давление. В случае бокового расширения, по нормали к действующему усилию, развивались образования, аналогичные описанным выше

кольцевым структурам. Возникающее течение выдавливания формирует структуры макрофлюидального полосчатого сложения со слоистым расположением минеральных и газовых включений [9].

Рассмотренные материалы позволяют считать кольцевые структуры в воронках газового выброса результатом воздействия высокого давления со смещением на границе локального газонасыщенного ледогрунтового тела и вмещающего массива мёрзлых пород. Различная морфология и мощность кольцевых структур зависит от длительности воздействия, связанной с подготовки взрывного процесса (от 1-2 до десятков и сотен лет), гранулометрического состава минеральной составляющей (пески, суглинки), льдистости, глубины залегания газонасыщенной зоны, величины возникающих давлений и других факторов.

Пластические деформации кровли мёрзлых пород с образованием бугров на поверхности.

К настоящему времени предложено несколько гипотез развития локальных геодинамических систем, реализующихся во взрывах и образовании воронок газового выброса. Для них характерны различные наборы процессов и промежуточных структур. Но одна структура обязательна для всех гипотез, это перекрывающий слой мёрзлых пород. Именно он под действием давления снизу, подвергается пластическим деформациям, выражающимся в формировании бугра пучения. После взрыва эта часть воронки разрушается быстрее всего, поэтому от неё часто ничего не остаётся. Рассмотрим некоторые примеры строения сохранившихся бугров пучения.

Слоистые суглинки, составляющие верхнюю часть разреза мёрзлых пород Ямальского кратера (ГЕС-1), испытали мощное воздействие газонасыщенного ледогрунтового штока. Данное воздействие привело к пластическим деформациям мёрзлой кровли и формированию бугра высотой около 8 м и около 50 м в диаметре. На фотографии, сделанной в 2015 году видна часть газонасыщенного ледогрунтового штока и облегающего его слоистого суглинка (рис. 2.8). В центральной части, соответствующей вершине бугра пучения изгиб слоём максимален. В краевых частях слои опускаются и погружаются под воду образовавшегося в кратере озера

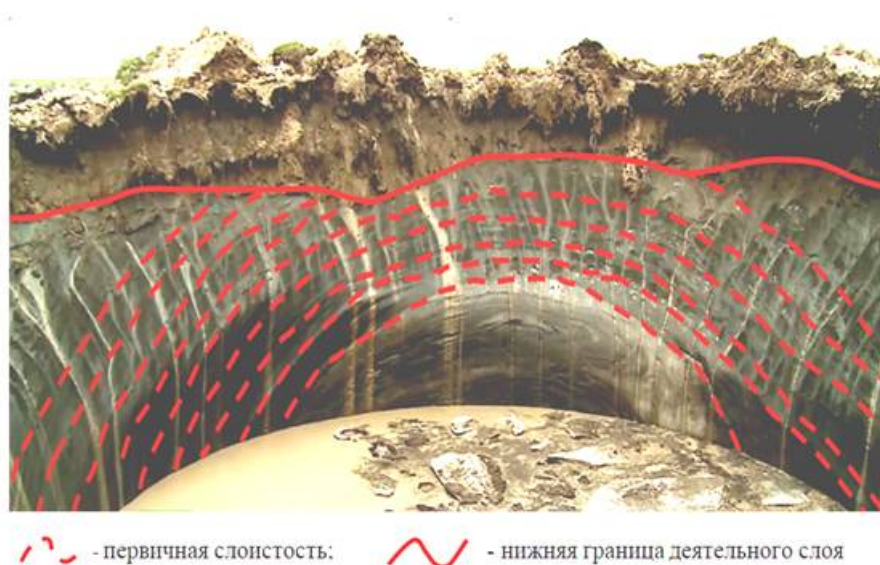


Рис. 2.8. Куполовидная деформация кровли многолетнемёрзлых пород кратера над газонасыщенным ледогрунтовым штоком. Скриншот с видео «тайна Ямальского кратера» [10].

Для Дерябинской воронки (YeniGEC) наблюдаются аналогичные процессы. Взрыву, приведшему к формированию воронки, предшествовал этап интенсивного движения ледяного тела, деформировавшего перекрывающие отложения (рис. 2.9) и сформировавшего бугор пучения. Здесь же, в слое глинистой породы, прилегающему к выпирающему ледяному ядру, фиксируется зона трещин, субпараллельных поверхности раздела. При всей непохожести строения этих двух бугров пучения, механизм развития контактной зоны между движущимся ледяным ядром и вмещающей породой аналогичен механизму формирования кольцевых структур рассмотренных выше.



Рис. 2.9. Дерябинская воронка. Деформации перекрывающих ледяное тело пород.

Фото В. Епифанова [\[11\]](#)

Рассмотренные выше бугры, сложены суглинистыми грунтами, поэтому давление снизу приводило к развитию пластических деформаций, предшествующих взрыву. Рост бугров продолжается десятки лет С.П. Арефьев оценивает возраст бугра около Ямальского кратера в 62–75 лет, а вертикальную скорость его роста примерно в 8 см/год [\[12\]](#). В том случае, когда верхняя часть разреза сложена мёрзлыми песчаными породами рост бугров происходит гораздо быстрее. Например, бугор у Еркутинской воронки рос около 2 лет (ErkGEC), примерно такой же возраст бугра около Сеяхинской воронки (SeYkhGEC) в обоих случаях верхняя часть разреза сложена мёрзлыми песками. Вероятно, это связано с тем, что в мёрзлых песках быстрее нарастают хрупкие деформации, разрушающие кровлю газонасыщенной зоны. В некоторых случаях чётко выраженные бугры могут не формироваться, как, например, в случае Воронки Осокина (рис. 2.10). Здесь мёрзлая толща представлена пластовой залежью перекрытой маломощным грунтовым слоем (около 1 - 2 м). Взрыв произошёл быстро, подготовительный период был краток. Стенки воронки угловатые, кольцевых структур, обрамляющих стенки воронки не наблюдается. При этом расширение в нижней части воронки (зона каверн и гротов сформирована. Интересной особенностью данной воронки является формирование вокруг неё двух чётко выраженных кольцевых трещин намного превосходящих по размеру саму воронку. Вероятно, на небольшой глубине в основании пластовой залежи сформировалась газовая полость, давление в которой было достаточно, чтобы приподнять мёрзлую кровлю (в данном случае давление могло составлять несколько атмосфер). Нарастание хрупких деформаций привело к выбросу льда на поверхность. Разброс обломков не превышает 20 м. После выброса порода осела, в результате чего сформировались кольцевые трещины.



Рис. 2.10. Воронка Осокина (штриховым пунктиром выделены трещины оседания)

Дата съёмки 26. 07.13. Фото А. Б. Осокина

Бугры, формирующиеся на месте развития локальных газодинамических криогенных геосистем, внешне могут внешне не отличаться от сотен и тысяч многолетних бугров пучения, характерных для криолитозоны. При этом первая группа всегда будет малочисленна по сравнению со второй. Эта малочисленность обусловлена локальностью зон газонакопления в мёрзлых породах, которые приурочены или к газовым каналам, транспортирующим газ с глубин, или к зонам прогрева гидратосодержащих пород. Основное количество "классических" бугров формируется и разрушается в соответствии с хорошо разработанной в геокриологии теории их циклического развития.

Обсуждение результатов

Анализ строения строения воронок газового выброса показал, что во многих из них наблюдаются сочетание постоянно встречающихся образований, обладающих вполне определенными особенностями строения, обусловленным общими причинами их происхождения. Они расположены рядом друг с другом, реализуются в результате проявления последовательно направленных во времени процессах, при этом не обязательно связанных генетически.

Рассмотрим последовательность событий формирующих воронки газового выброса. В ходе формирования воронок газового выброса наблюдается серия сменяющих друг друга стадий, каждая из которых отличается индивидуальным набором парагенетических процессов и присущих им образований. Особенности развития геосистемы на каждой из стадий, подготавливает и во многом определяет её эволюционирование на следующей.

Вне зависимости от генезиса газа (различные варианты будут рассмотрены ниже) на определённой глубине возникает первичная газонасыщенная зона. По мере возрастания давления оно превысит гидростатическое, но его ещё недостаточно, для того чтобы выбросить мёрзлую породу сцементированную льдом за пределы кратера с глубины в несколько десятков метров [\[13\]](#). Газ, находящейся под давлением, начинает деформировать вмещающие породы. при этом формируется непрерывный фильтрационный поток, в котором газовый флюид из области с большим давлением, фильтруется в область с меньшим давлением (как правило, по направлению к поверхности). Неустановившееся «единое фильтрационное пространство» неоднородно, в различных его частях возникают градиенты давления, обеспечивающие фильтрационный массоперенос в мёрзлой породе. Проникая в трещины газовый флюид

оказывает силовое воздействие на стенки, что приводит к их расширению [14]. Наблюдается повсеместное присутствие различного рода деформаций, свидетельствующих о неоднородных и разнонаправленных локальных процессах, формирующих структуры выдавливания, течения, внедрения и др.. П.А. Шумский такоестроение связывает с течением выдавливания во льду, оно сопровождается интенсивным складкообразованием с возникновением макрофлюидального полосчатогосложения [15]

Широкое распространение вогнутых округлых углублений, формирующих вертикально ориентированные цепочки или большие изометричные скопления (ячеистый лёд), связаны со спецификой деформации газовых включений в мерзлых грунтах при ориентированном давлении. В этом случае наблюдается сплющивание воздушных пузырьков, которые приобретают форму дисков, ориентированных перпендикулярно направлению давления [15]. В движущемся льде происходит миграция и слияние отдельных газовых пузырьков. [9]. Судя по строению стенок воронок, центральный массив, залегающий непосредственно под бугром пучения представлял из себя газонасыщенное ледогрунтовое тело с пронизанное разнонаправленными трещинами и многочисленными пластическими деформациями, вплоть до течения льда а также многочисленными формами газовых включений (цепочки, изометричные включения округлой формы, червеобразные каналы, сотовые структуры и др. На контакте данного газонасыщенного ледогрунтового тела оказывающего давление на вмещающие породы и смещаясь относительно них формируется слоистая кольцевая структура, состоящая из чередующихся слоёв льда и ледогрунта. Все эти образования, отличающиеся разнообразием форм, являются парагенезами, сформировавшимися под действием общей причины, воздействия подземного газа, находящегося под значительным давлением. После того, как пластические деформации мерзлой кровли, достигнут определённого предела, происходит её разрыв, резкое снятие давления (декомпрессия) и выброс ледогрунтового материала, насыщенного находящимся под давлением газом.

Рассмотренный фильтрационно-деформационный механиз движения газа над газонасыщенной полостью, находящейся под избыточным давлением, приводит к формированию сильно деформированного ледогрунтового тела, пронизанного многочисленными газовыми флюидами разнообразной морфологии. По внешним признакам данное образование напоминает штокверк (рис. 2.11). Штокверк— рудное тело неправильной формы, образованное массой горной породы, пронизанной густой сетью различно ориентированных жил и мелких прожилков [16].

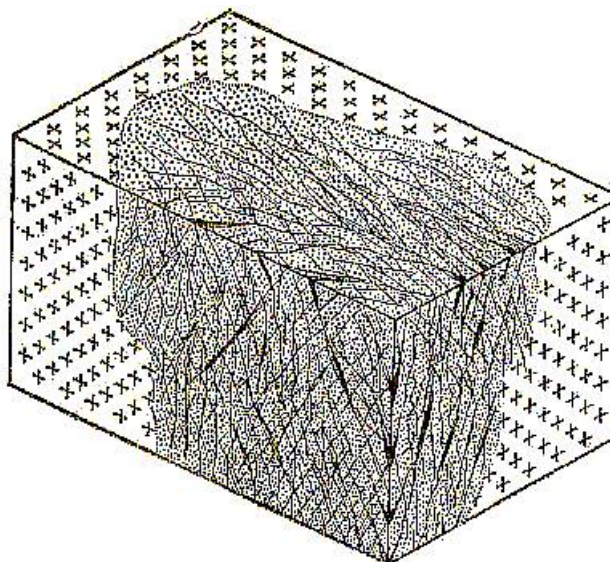


Рис. 2.11. Штокверк

Главной особенностью строения штокверков является локализация прожилков в таких зонах, где была максимальная концентрация напряжений сжатия. А затем, в результате возникновения трещин скола в условиях одновременного действия сжатия со сдвигом, резко повышается пустотность пород, что способствует проникновению магматических расплавов [17]. В случае воронки газового выброса вместо магмы в мёрзлый массив по зонам локальных деформаций фильтруется газ находящийся под большим давлением. В этом случае формирование кольцевой слоистой структуры вокруг кратера обусловлено продавливанием сквозь мёрзлый массив газонасыщенного ледогрунтового тела.

Причины формирования газонасыщенных зон с повышенным давлением

Рассмотренные выше материалы по криогенному строению воронок газового выброса показывают, что первопричиной подготовки взрывных процессов является формирование в толще мёрзлых пород газонасыщенных зон различного размера, в которых газ находится при повышенном давлении. Рассмотрим некоторые возможные причины их формирования.

В. И. Богоявленским предложена модель в которой формирование газонасыщенных полостей с высоким давлением в толщах льдистых мёрзлых пород, происходит под действием эндогенных процессов (аномальные тепловые потоки, повышенное давление, физико-химические реакции, газогидродинамические процессы) приуроченных к разломам [18].

Воронки приурочены к зонам повышенных тепловых потоков. Для Бованенковского месторождения приводится экстремум ТП 62 мВт/м² расположенный в центре Бованенковского НГКМ где теплоток наибольший. Но если посмотреть данные по мощности мерзлоты и криогенному строению выясняется, что мощность ММП зависит прежде всего от геоморфологического уровня. Так на пойме она составляет 110-230м, а на III морской террасе изменяется от 276 до 279м [19]. В зоне повышенных тепловых потоков наблюдается широкое распространение пластовых льдов и высокольдистых мёрзлых пород, имеются признаки залегания гидратонасыщенных пород. Таким образом, разогрев снизу никак не отразился на интенсивности криогенных процессов и льдовыделении в данных регионах. Следовательно, влияние тектоники на поступление газа должно было сказаться в формировании каналов, проникающих в мёрзлую толщу.

Наиболее благоприятными условиями для формирования газовых каналов являются зоны тектонических нарушений. В них наблюдается наибольшая деформированность, осадочных толщ, что облегчает миграцию внутригрунтовых газов. Справедливо утверждается, что наличие каналов подтока газа в полость является обязательным условием его последующего выброса (взрыва) [18]. При этом никаких каналов протачивающих снизу не на Бованенковском месторождении не обнаружено, хотя изученность территории очень высокая. Если они не зафиксированы, то предложенный механизм остаётся гипотетическим и не подтверждённым. При обосновании образования воронок газового выброса за счёт подтока глубинного газа в качестве наиболее убедительным доводом могло бы быть выявление подводящих каналов. Геофизические методы позволяют успешно делать это. На морских шельфак успешно выделяются и газовые каналы выводящие газ с больших глубин на поверхность, и зоны накопления газа (газовые карманы), и места взрывного выхода газа на поверхность (покмарки). Комплексы объединяющие покмарки, газовые карманы и газовые трубы представляют из себя флюидодинамические газонасыщенные геосистемы. Каждый элемент данной геосистемы соответствует определённому этапу её развития. В центральной части рис. 2.12. показан пример полного законченного развития данной геосистемы. Хорошо заметны парагенетической связи покмарка, газового кармана и газового канала. Непосредственно под кратером покмарка залегает газовый карман, который сформировался за счёт подачи газа по газовому каналу с более глубоких горизонтов. Накопление газа в газовом кармане и увеличение порового давления в верхней части осадочного чехла, привело к пневматическому взрыву, выделению газа в водную среду и формированию покмарка. В газовом кармане после сброса давления продолжается накопления газа, поступающего по газовому каналу. В правой части рисунка представлен пример незавершённой геосистемы. Из основных стадий развития флюидодинамической газонасыщенной геосистемы выражены две, формирование газового канала и формирование газового кармана. Накопление газа в газовом канале ещё не привело к выбросу.

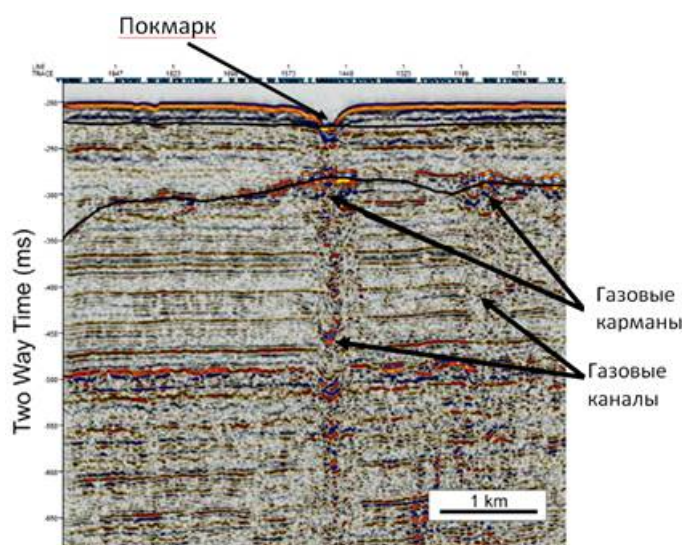


Рис. 2.12. Сейсмический профиль глубинной миграции газов в морских осадках

[20] (с добавлениями)

Если осадочная толща состоит из проницаемых отложений и экраны из нефилтрующих горизонтов отсутствуют, флюидодинамическая газонасыщенная геосистема может состоять только из газового канала. Газовые трубы, в виде вертикальных зон потери корреляции, проявляются по всей видимой осадочной толще, вплоть до выхода на

поверхность дна. Однако чаще «трубы» до поверхности дна не доходят, кроме того, могут выглядеть не только как четкие «столбы» потери корреляции до прозрачности, но и просто как вытянутые зоны ослабления сигнала. В этом случае они могут заканчиваться «ярким пятном», либо ассоциируются с локальными зонами дифракции [21].

Рассмотренная гипотеза формирования газонасыщенных зон базируется на поступлении тепла и газа с глубин. Могут ли быть иные причины? Несомненно, могут. Потенциальным источником газа, находящегося под давлением могло быть разложение газовых гидратов содержащихся в мёрзлых породах и «газовые карманы» свободного газа.

При этом следует учитывать, что вклад газа в растворённом или свободном виде в мёрзлых льдонасыщенных породах незначителен по сравнению с клатратной формой. [22]. Роль газогидратов в криогенном строении пород севера Западной Сибири наглядно проиллюстрирована на криогидратном профиле Ямальского региона в мёрзлых породах различных НГКМ нефтегазовых месторождений (рис. 2.13). [23]. На нём показано, что слой метастабильных газогидратов широко распространен на Ямале, например на Бованенковского НГКМ он прослеживается на всю мощность мёрзлых пород (рис. 2.13).

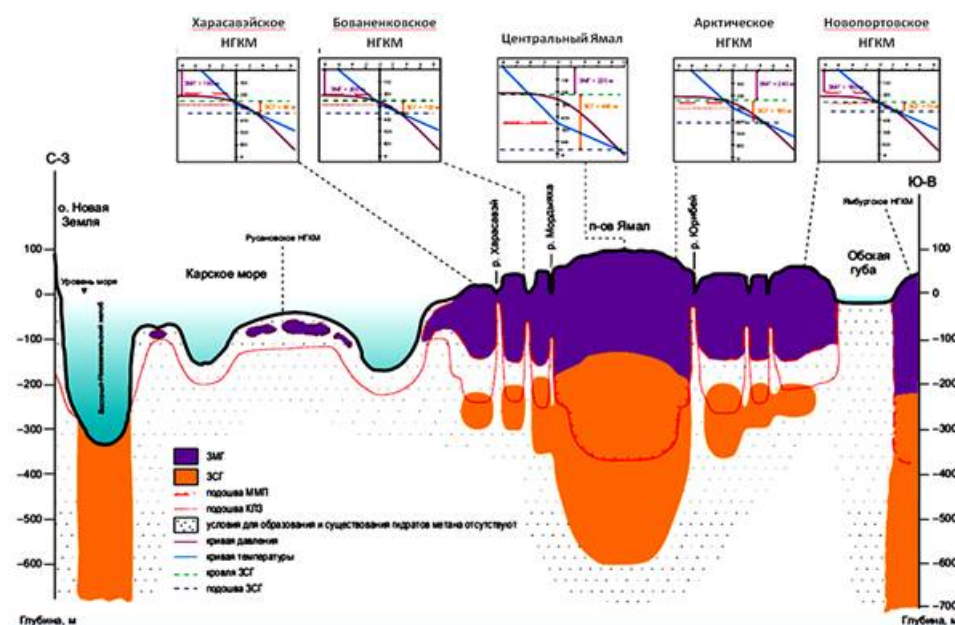


Рис. 2.13. Региональный криогидратный профиль Ямальского региона, направление С-3 – Ю-В (Русановское, Харасавейское, Бованенковское, Средняямаляское, Арктическое, Ямбургское месторождения) [23].

Источником тепла, нагревающим слой газогидратов до температур, при которых происходит их диссоциация, может служить прогрев под поверхностными водоёмами (реки, озёра, участки повышенного снегонакопления и др.) [13]. Роль самоконсервации в условиях нагрева метастабильных газогидратов в реальных условиях недостаточно изучена и, скорее всего, преувеличена. В верхней части разреза (первые десятки метров) гидратосодержащие мёрзлые породы находятся в нестабильных условиях. На таких глубинах они существуют только условиях низких температур и любой разогрев может привести к необратимой диссоциации. При возможности фильтрации газа из зоны разложения её скорость только усилится.

Ландшафтные факторы формирования воронок газового выброса

Анализ материалов исследования воронок газового выброса, обнаруженных на севере Западной Сибири показывает, что поверхностные условия могут оказывать значительное влияние на формирование воронок газового выброса. Все воронки приурочены к так называемым "тёплым" мерзлотным ландшафтам вблизи водоемов. GEC-1 расположена на стыке хасырея и нижней части склона, поросшего кустарником; GEC -2, сформировалась в долине ручья; GEC-3 и YenigEC сформированы на берегу водоёма; SeYkhGEC образовался непосредственно вблизи русла реки; ErkGEC образовался в пойме реки, вблизи старичного озера в полосе кустарника; AntGEC сформирован на месте хорошо прогреваемого песчаного раздува, на бровке террасовой поверхности разрушаемой термоэрозионными процессами; воронка Осокина расположена на днище ложбины покрытой кустарником. Воронка, обнаруженная в 2020г расположена в зоне озёрной котловине.

Материалы свидетельствующие об нахождении поверхностных водоёмов на месте некоторых воронок

(Ямальский кратер, воронка обнаруженная в 2020г)

Исследования экспедиции МГУ под руководством В.З. Хилимонюк показали, что в озёрной котловине, где сформировался Ямальский кратер под хасыреями, полосами стока, зарослями кустарников наблюдаются высокие среднегодовые температуры в диапазоне $-1 - -3^{\circ}\text{C}$ [24]. На рис. 2.15 представлены данные по содержанию газа в отложениях вскрытых скважинами. Отложения, в которых прослеживается повышенное содержание газа формируют линзовидное тело мощностью около 10 м. Наибольшее общее содержание газа приурочено к центральной части линзы. Данный слой соответствует двустороннему промерзанию подоёрного талика. Сходное строение наблюдается и в отношении содержания углекислого газа. В нижней и верхней части линзы его количество уменьшается. В подстилающих линзу отложениях общее содержание газа и углекислого газа наименьшее. В отношении содержания метана наблюдается обратная зависимость в центральной части линзы его содержание наименьшее, а в подстилающих осадках наибольшее. (рис. 2.14) [25, 26]. Приведённые данные свидетельствуют о том, что мощность талика под озером не превышала 10-15м.

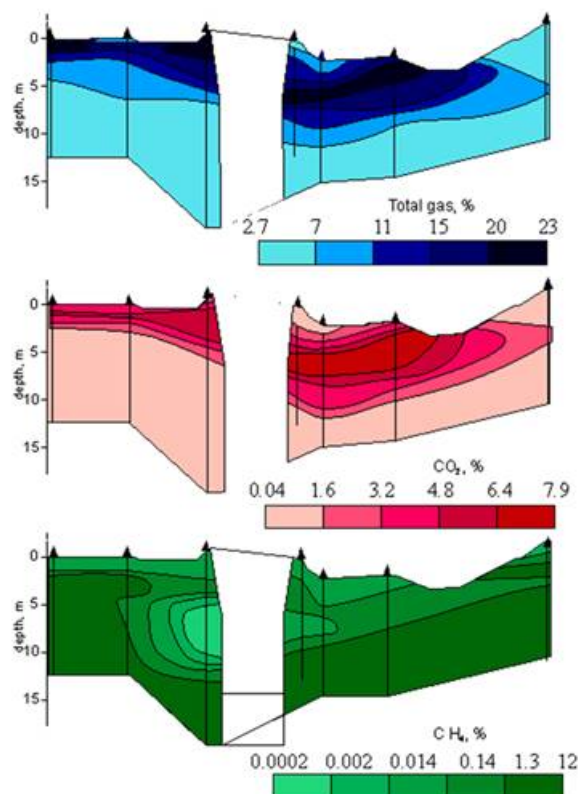


Рис. 2.14. Содержание газа в подземном льду [26].

Общая концентрация газа представлена в % при нормальных условиях, нормированных к объему подземного льда. Для CO_2 и CH_4 – в % в газовой смеси при нормальных условиях. Судя по результатам анализа содержания газа мощность подозрительного талика, не превышала 10-15 м. Ниже породы оставались в мерзлом состоянии. Промерзание талика и дало наблюдаемую картину. Линза льдистой слоистой мерзлой породы, с повышенным содержанием углекислого газа, соответствующая талику под озером вложена в массив с повышенным содержанием метана.

Обнаруженная в 2020г воронка газового выброса расположена на ровной поверхности 3 морской террасы в пределах заболоченной обводнённой ложбины, образовавшейся на месте существовавшего ранее поверхностного водоёма (рис. 2.15). О наличии озера свидетельствует зона вторично промёрзших таберальных отложений залегающих между отложениями деятельного слоя и морских осадков с сетчатыми криогенными текстурами (рис. 2.16). Горизонт некогда оттаявших под озером, а затем промёрзших отложений имеет линзовидную форму (рис. 2.18), мощность этого горизонта меняется от 3 до 10-12м. Контакт с нижележащими льдистыми глинами чёткий, ровный (рис. 2.16, 2.17). Данное геологическое строение позволяет делать обоснованное предположение, что причиной формирования воронки мог быть прогрев мерзлой толщи, в состав которой входили гидратосодержащие породы. Как в случае Ямальского кратера основным источником газа, обуславливающим взрывные процессы в многолетнемёрзлых грунтах, являются выделения метана при разложении газогидратов залегающих в основании пластовых льдов, а причиной нагрева, выводящего их из равновесного состояния – образовавшееся на поверхности озеро.



Рис. 2.15. Воронка газового выброса, расположенная в пределах ложбины
на поверхности третьей морской террасы [\[7\]](#)



Рис.2.16. Воронка газового выброса, обнаруженная в 2020г на Ямале.

1- нижняя часть воронки; 2 – зона деформированных криотекстур; 3 – зона морских суглинков с сетчатыми криотекстурами; 4 – зона вытаявавших под озером и вновь промёрзших морских суглинков. Скриншот видео The mystery of Siberia's exploding craters

[\[21\]](#)



Рис. 2.17. Строение верхней части воронки, обнаруженной в 2020 г

— — — — — граница нижней части деятельного слоя; — — — — — верхняя граница глинистой толщи с сетчатыми криотекстурами. [7]

В качестве основной причины формирования Ямального кратера предлагается всестороннее промерзание подоёрного талика [25]. Происхождение воронки, обнаруженной в 2020 году связывается с поступлением глубинного газа [18]. В первом случае химический состав газов (повышенное содержание углекислого газа) во льду определённо свидетельствует о наличие линзы талых отложений мощностью не более 15м и двухстороннем промерзании. Ниже породы насыщены метаном. Таким образом талик под озёром был небольшим, ниже мёрзлая толща не протаивала а лишь нагревалась. В воронке обнаруженной в 2020 г, чётко прослеживается линзовидное тело с разрушенным первичным криогенным строением, залегающей над толщей с типичным для морских отложений III морской террасы криогенным строением (сетчатые криотекстуры). Данное геологическое образование прурочено к ложбине на поверхности соответствующей существовавшему ранее водоёму. И в этом случае наблюдается формирование поверхностного водоёма, небольшой таликовой зоны под ним и подстилающей растеплённой зоны мёрзлых пород. Данные геологические и геохимические материалы позволяют непротиворечиво объяснять происхождение. Воронок газового выброса за счёт прогрева сверху, диссоциация газогидратов и последующим создание газонасыщенной зоны с повышенным давлением.

Воронки газового выброса как криогенный феномен

Воронки газового выброса на севере западной Сибири расположены в многолетнемёрзлых породах, поэтому чрезвычайно важно выявить роль криогенного фактора в их формировании. Обязательным условие формирования воронок является появление в толще мёрзлых пород локальной газонасыщенной зоны с повышенным давлением газа. Как уже было рассмотрено выше может быть несколько причин возникновения данных зон.

В случае подачи газа по каналам связанным с тектоническими нарушениями газ поступает с более глубоких горизонтов. Газовые каналы не прорывают толщу мёрзлых пород. В этом случае фиксировались бы мощные выходы глубинного газа, а этого не наблюдается Следовательно если подводящие каналы имеются, то они упираются в зоны разгрузки и накопления газа. В этом случае криогенный фактор является важнейшим. Именно он локализует область, где транзита переходит в зону накопления. Пока ещё

закономерности нахождения данных областей не выяснено, они могут определяться повышенной льдистостью (пластовые залежи), вещественным составом пород, или их переслаиванием. Важно то, что уже на этом этапе криогенный фактор является существенным.

В случае всестороннего промерзания таликов формирование газонасыщенной зоны и высокого давления в ней целиком определяется криогенным фактором.

Формирование газовых карманов также может определяться криогенезом. Эпигенетическое промерзание приводит: во-первых, к криогенной концентрации грунтовых вод, газов и растворённых солей; во-вторых, формирует экран препятствующий выходу воды и газов на поверхность. В зоне формирования ледяных массивов фронт промерзания значительно отстаёт от менее водонасыщенных участков. Это вызывает дополнительный криогенный напор концентрирующий воду на месте формирования пластовой залежи. Г.И. Дубиковым установлена связь пластовых льдов с подстилающими их песками [\[28\]](#). В результате наложения природных факторов: неравномерного эпигенетического промерзания, движение газонасыщенных грунтовых вод, формирование пластовых льдов и криопэгов, в толще многолетнемёрзлых пород формируется сложная криогенная геосистема, включающая парагенетический комплекс криогенных образований: высокольдистые мёрзлые отложения, пластовые залежи подземных льдов, криопэги, газонасыщенные зоны с повышенным давлением. И формирование гидратосодержащих мёрзлых пород, и возникновение газонасыщенных зон за счёт разложения газогидратов также определяется криогенными процессами. Образования устойчивых газовых полостей сопровождается криогенными процессами, которые определяются прочностными и деформативными свойствами мёрзлых пород.

Образование подземных первичных полостей это необходимое, но недостаточное условие формирования воронок газового выброса. Через образовавшиеся деформации газ из зоны накопления может фильтроваться на поверхность. Это довольно часто наблюдается в озёрах, где происходит фильтрация газа (голубые озёра). Если газонасыщенная зона окружена достаточно прочными льдистыми вмещающими породами, газ под давлением может остаться долгое время, без какого либо движения. В обоих случаях газонасыщенная зона с повышенным давлением газа формируется, но взрыва и формирование воронки не происходит. Подготовка взрывного процесса происходит в том случае, когда под воздействием давления, возникающего в газовой полости, во вмещающих (преимущественно в перекрывающих) мёрзлых породах, начинают развиваться деформации. Чем ниже температуры, тем большие давления необходимы для возникновения деформаций. Проведённые лабораторные исследования показали, что деформации в мёрзлых льдистых образцах и фильтрация газа в них начинается при температурах около $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ [\[29\]](#). Развивается система дефектов, трещин, пластических и разрывных деформаций, течения льда и др. Газовые флюиды начинают фильтроваться вверх в область меньших пластовых давлений образуя различного рода газовые включения в виде цепочек, изометричных скоплений, газовых лент, сотовых структур и др. Таким образом, над газовыми полостями формируется локальная газодинамическая криогенная геосистема, смещающаяся вверх относительно неподвижных вмещающих пород и формирующая над собой многолетний бугор пучения. Формирование данной геосистемы обусловлено серией сменяющих друг друга криогенных процессов. Если проанализировать большинство публикаций, связанных с формированием воронок газового выброса, то можно отметить, что основное внимание в них уделяется морфометрии, динамике бугров, предшествующих взрыву, морфологии поля разброса обломков, и гипотезам происхождения газа. Иногда рассматривается

состав газа применительно к проблеме выявления его генезиса. Фактически решаются 2 задачи, выявление происхождения газа и морфометрический анализ результатов взрыва. При этом, подготовка взрывного выброса газа, структурные изменения мёрзлого массива, процессы, участвовавшие в этих изменениях за редким исключением [\[30, 13 и др.\]](#) не анализируются. Таким образом, геологический фактор, в нашем случае геокриологический, не используется для выявления истории развития локального участка мёрзлой толщи, где происходит взрыв подземного газа. Вероятнее всего, это связано с тем, что в рамках традиционных представлений, многие процессы, выявленные при изучении воронок газового выброса, ещё слабо разработаны или вообще не включены в понятийный аппарат геокриологии. Традиционные представления должны быть расширены за счёт теоретических положений, используемых в рамках геологии, тектоники, вулканологии и других наук о Земле. Очевидно, что в этом случае необходима разработка новых подходов, учитывающих динамические процессы, происходящие в мёрзлом массиве. Например, переходить от структурно-генетического метода изучения мёрзлых пород, базирующимся на выявлении процессов формирования тех или иных криогенных структур к структурно-динамическому, изучающему трансформацию уже сформировавшихся криогенных образований. Необходимо разработать методику изучения процессов, связанных с возможностью фильтрации газа в мёрзлых льдистых породах, условий возникновения полостей и движения ледогрунтовых масс в мёрзлой толще и др. Эти и другие проблемы, возникшие при изучении взрывных процессов в мёрзлых породах, могут быть решены только в рамках геокриологии.

Заключение

Анализ строения строения воронок газового выброса показал, что формирующие их криогенные образования, обладающих вполне определенными особенностями строения образуют парагенезы. Они обусловлены общей причиной своего происхождения – наличием полости газа, находящегося под высоким давлением, расположены рядом друг с другом в одном геологическом теле, реализуются в результате совместного действия различных, но однонаправленных во времени процессах, при этом не обязательно связанных генетически.

Подготовка взрывного процесса, образующего воронку газового выброса, осуществляется за счёт локальной газодинамической геосистемы, которая возникает под воздействием сформировавшейся газовой полости с высоким давлением газа. Развитие данной геосистемы обусловлено сменой комплексов криогенных процессов и соответствующих им парагенезов криогенных образований. В период подготовки взрыва, первичное строение мёрзлой породы деформируется и перестраивается в соответствие с возникающими давлениями и объёмами поступающего газа.

Следует различать факторы, влияющие на возникновение локальных газонасыщенных зон и факторы, обуславливающие развитие связанных с ними газодинамических геосистем. Первые связаны с созданием условий нарушения термодинамического равновесия в мёрзлой толще, вторые обеспечивают формирование и развитие локальной газодинамической геосистемы, подготавливающей взрыв. Газ в мёрзлом массиве может накапливаться по разным причинам: фильтрация по разлому с глубины, разложение газогидратов, криогенная концентрация свободного газа, накопление свободного газа в литологически обусловленном "газовом кармане" (песчаная линза в глинистой толще и др. При этом ничего не будет происходить, если он будет запечатан. Необходим комплекс процессов в мёрзлых породах, чтобы не только сам газ пришёл в движение, но

и мёрзлая порода трансформировалась. Судя по буграм пучения вырастающими на месте будущих взрывов, эта трансформация может занимать от нескольких лет до десятков, а может и сотен лет.

Основные гипотезы возникновения газовых полостей, в которых газ находится под высоким давлением (поступление глубинного газа, всестороннее промерзание таликов, разложение газогидратов под воздействием растепления мёрзлых пород), и механизмы подготовки взрывных процессов, вероятно, соответствуют разнообразию геологических, тектонических, ландшафтных условий. Придавать какой либо из них обобщающий характер было бы явным упрощением. Данные гипотезы будут реализовываться в виде различных сценариев развития локальных газодинамических геосистем, соответствующих конкретным территориям.

Совокупность процессов, формирующих воронки газового выброса, следует относить к криогенным, поскольку они обусловлены прочностными и деформационными свойствами, фазовыми переходами воды, структурно-текстурными особенностями криогенного строения мёрзлых пород.

Современное состояние изученности воронок газового выброса требует перехода от гипотетических представлений о причине возникновения локальных зон повышенного давления газа в мёрзлых породах к выявлению сценариев развития локальных газодинамических геосистем в конкретных геокриологических условиях. Для этого необходимо дальнейшее совершенствование геокриологических, геохимических и геофизических методов исследования и их более широкое применение при изучении данных образований.

Проблемы, возникающие при анализе строения воронок газового выброса, могут быть решены только при расширении классических представлений в геокриологии и включения в неё положений, разработанных в рамках геологии, тектоники, вулканологии. Несомненно, процессы, формирующие данные образования следует относить к криогенным, поскольку они базируются на фазовых переходах, механических характеристиках, массообменных процессах, прочностных и деформационных характеристиках, структурно-текстурных особенностях характерных для мёрзлых пород.

Библиография

1. Лейбман М. О., Кизяков А. И. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа. № 2, 2016. С. 15-24.
2. Стрелецкая И. Д., Лейбман М. О., Кизяков А. И., Облогов Г. Е., Васильев А. А., Хомутов А. В., Дворников Ю. А. Подземные льды и их роль в формировании воронки газового выброса на полуострове Ямал // Вестник Московского университета. Серия 5: География, 2017. Т. 1. № 2. С. 91–99.
3. Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Лейбман М.О., Зимин М.В., Хомутов А.В. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на центральном Ямале // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 2. С. 15–25.
4. <https://www.youtube.com/watch?v=BCvqHHRO-Q4>
5. 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.
6. http://raznooje.blogspot.com/2017/07/blog-post_9.html. от 3 июля 2017 г

7. Vasily Bogoyavlensky, Igor Bogoyavlensky, Roman Nikonov, Tatiana Kargina, Evgeny Chuvilin, Boris Bukhanov and Andrey Umnikov New Catastrophic Gas Blowout and Giant Crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the Expedition and Data Processing // *Geosciences* 2021, 11, 71. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020071>
8. Гзовский М. В. Основы тектонофизики М.: Наука. 1975. 536 с.
9. Соломатин В. И. Физика и география подземного оледенения / В.И. Соломатин. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2013, 346 с
10. <https://russian.rt.com/article/105424>
11. Епифанов В.А. Взрывные воронки-колодцы в климатических событиях и ландшафтных преобразованиях четвертичного периода // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. №76. 2018. С.5 – 40
12. Арефьев С.П., Хомутов А.В., Ермохина К.А., Лейбман М.О. Дендрохронологическая реконструкция процесса формирования газового бугра на месте ямальской воронки // *Криосфера Земли*, 2017. Т. XXI, № 5. С. 107–119.
13. Хименков А.Н., Станиловская Ю.В. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера. // *Арктика и Антарктика*. – 2018. № 3. С. 1 - 25. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27524
14. Трофимов, В. А. Определение давления газа в угольном пласте // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отд. вып. 1: Труды Международного научного симпозиума "Неделя горняка-2012". 2012. С. 324-345.
15. Шумский, 1955, с. Шумский П.А. Основы структурного ледоведения. М.: Изд-во АН СССР. 1955. 491 с
16. Горная энциклопедия. М.: Советская энциклопедия. Под редакцией Е. А. Козловского. Т. 5. 1991.
17. Вольфсон Ф. Н., Яковлев П. Д. Структуры рудных полей и месторождений. М.: Недра. 1975. 271с.
18. Богоявленский В. И. Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // *Арктика: экология и экономика*. 2021. Т. 11, № 1. С. 51—66. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-51-66.
19. Криолитозона Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / Под общ. ред. Ю.Б. Баду, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М.: ООО Газпром экспо, 2013. 424 с.
20. 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.
21. Флюидодинамические аномалии Каспийского моря // «Neftegaz.RU» 2019. №1. С.74-78.
22. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. М.: ГЕОС. 2007. 137с.
23. Перлова Е.В., Микляева Е.С., Леонов С.А., Ткачёва Е.В., Ухова Ю.А. Газовые гидраты полуострова Ямал и прилегающего шельфа Карского моря как осложняющий фактор освоения региона // *Вести газовой науки*. 2017. No 3 (31). С. 255–262.5.
24. Хилимонюк В. З., Оспенников Е. Н., Булдович С. Н., Гунар А. Ю., Горшков Е. И. Геокриологические условия территории расположения ямальского кратера // Пятая конференция геокриологов России. Т. 2. М.: Университетская книга. 2016. С. 245–

255.

25. Buldovich S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y., Ospennikov E.N., Vorobyev S.A., Gunar A.Y., Gorshkov E.I., Chuvilin E.M., Cherbunina M.Y., Kotov P.I., Lubnina N.V., Motenko R.G., Amanzhurov R.M. 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
26. Supplementary Materials for Cryovolcanism on the earth: Origin of a spectacular crater in the Yamal peninsula (Russia) Buldovich S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y., Ospennikov E.N., Vorobyev S.A., Gunar A.Y., Gorshkov E.I., Chuvilin E.M., Cherbunina M.Y., Kotov P.I., Lubnina N.V., Motenko R.G., Amanzhurov R.M. // Scientific reports. 2018 . Vol. 8.
27. <https://www.bbc.com/future/article/20201130...siberias...craters>
28. Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. М.: ГЕОС. 2002. 246 с.
29. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Станиловская Ю.В. Геосистемы газонасыщенных многолетнемерзлых пород // Арктика и Антарктика. 2020. № 2. С. 65 – 105.
30. Хименков А. Н., Сергеев Д. О., Станиловская Ю. В., Власов А. Н., Волков-Богородский Д. Б. Газовые выбросы в криолитозоне, как новый вид геокриологических опасностей // Геориск. № 3. 2017. С. 58-65.

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Рецензия на статью «Парагенезы криогенных образований воронок газового выброса 2 Часть Криогенный фактор в формировании воронок газового выброса»

Предметом исследований рецензируемой статьи явились парагенезы процессов и образований криогенной толщи, создающие необходимые условия для образования воронок газового выброса. Изложению основных положений концептуальной модели формирования воронок газовых выбросов предшествует обзор уже существующих работ по данной проблеме. Опираясь на методы эмпирических исследований выдвинута собственная рабочая гипотеза происхождения воронок газового выброса. По сравнению с аналогичными объектами на морском дне (покмарками), обнаруженных в 60-х гг. прошлого века, изученные структуры еще слабо изучены, хотя взрывы бугров пучения известны уже давно (Геворкян С.Г., Корейша М.М., 1993). Процессы формирования кратеров, практически мгновенное возникновение крупных отрицательных форм рельефа (глубоких воронок), разлет обломков мерзлых пород представляет серьезную угрозу для нефтегазовых сооружений в Западной Сибири и в других местах нефтегазодобычи. В этой связи тема статьи представляется весьма актуальной. Несмотря на многочисленные публикации по рассматриваемой проблеме (по нашей оценке, к настоящему времени по обсуждаемому вопросу опубликовано приблизительно 50-60 научных статей), статья отличается определенной новизной. Пожалуй, впервые показано, что не только эндогенные факторы, роль которых отдельными специалистами еще недостаточно обоснована фактическим материалом, но и некоторые поверхностные условия могут оказывать существенное влияние на формирование воронок газового выброса. К элементам новизны можно также отнести детальное описание выявленных кольцевых структур, приуроченных к стенкам воронок. К стилю статьи замечаний нет. Изложение логичное, лексика употребляется общенаучная, структура статьи четкая,

имеются обязательные элементы научного произведения: аннотация, введение, содержательная часть, заключение, библиография. К сожалению, в списке литературы отсутствует ссылка на работу Истомина В.А. Якушева В.С. Газовые гидраты в природных условиях, 1992, которые, пожалуй, впервые обобщили огромный эмпирический материал по клатратам. Между тем, как нам представляется, именно разложение газогидратов является основным источником газа, локальные скопления которого в т. н. газовых карманах определяют места последующих выброса (взрыва) и образования воронки на поверхности земли. Указанный источник газа, наряду с другими, упомянут и автором (авторами) статьи. Полемизируя с В. И. Богоявленским, который отдает предпочтение эндогенным факторам при образовании воронок, и, в частности утверждает, что газ поступает по подводящим каналам из глубинных горизонтов земной коры, автор (авторы) справедливо отмечают, что такие структуры на Бованенковском месторождении не обнаружены. Справедливости ради, надо отметить, что подводящие каналы, например, такие как на рис. 2.12 статьи не всегда могут быть обнаружены геофизическими методами. Многое зависит от плотности наблюдений, разрешающей способности метода и др. В «Заключении», подводя итоги выполненных исследований отмечается, что решить проблему происхождения таких сложных объектов как воронки газового выброса можно только применяя междисциплинарный подход. Статья безусловно вызовет интерес у специалистов разного профиля, включая работников в области промышленной безопасности.