

УДК 551.345;551.435.53

ВЗРЫВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД – НОВЫЙ ВИД ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

© 2019 г. А. Н. Хименков^{1,*}, Д. О. Сергеев¹, А. Н. Власов^{2,**}, Д. Б. Волков-Богородский²

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия
*E-mail: a_khimenkov@mail.ru

²Институт прикладной механики Российской академии наук,
Ленинградский пр., 7, Москва, 125040 Россия
**E-mail: iam@iam.ras.ru

Поступила в редакцию 28.09.2019 г.

Предмет исследования – естественные и техногенные взрывные процессы на территории распространения многолетнемерзлых пород. Предложен новый подход к теории формирования воронок газового выброса, базирующийся на механизме миграции газовых флюидов из зоны диссоциации газогидратов в вышележащую толщу многолетнемерзлых пород. Зона диссоциации формируется на участках локального прогрева за счет поступления тепла сверху. Показана стадийность процессов подготовки взрывного процесса, сформировавшего Ямальский кратер. Выделены и охарактеризованы фазы подготовки естественных взрывных процессов. Рассмотрены различные сценарии подготовки естественных взрывных процессов в криолитозоне. Основные выводы проведенного исследования: взрывы гидролакколитов и образование воронок газового выброса относятся к одной группе процессов – физическим взрывам естественного происхождения; подготовка взрывных процессов в многолетнемерзлых породах проходит через несколько стадий; миграция газовых флюидов играет большую роль при подготовке взрывов естественного происхождения в многолетнемерзлых породах. По мере освоения Арктики тепловое воздействие на многолетнемерзлые породы будет возрастать, опасность взрывных процессов для инженерных сооружений увеличится. Тем не менее данная группа процессов не только не учитывается при выборе проектных решений и прогнозах взаимодействия инженерного сооружения с многолетнемерзлыми грунтами, но даже не включена в группу опасных геологических процессов.

Ключевые слова: воронка, газовый выброс, флюиды, диссоциация, газовые гидраты, криолитозона, физический взрыв, зона транзита, газонасыщенные геосистемы, стадии развития.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019630-41>

ВВЕДЕНИЕ

Статья посвящена взрывным процессам в многолетнемерзлых породах (ММП), обусловленным естественными и техногенными причинами. Некоторые из них описаны давно и связаны с промерзанием воды в замкнутых условиях (взрывы гидролакколитов и наледных бугров) или с выбросом газа при бурении скважин. В последние 5 лет в отдельную группу выделены естественные выбросы подземных газов, не связанные с какими-либо техногенными воздействиями.

Рассматриваемые процессы относятся к физическим взрывам, связанным с возникновением внутреннего давления в полости, заполненной жид-

костью или газом, которое превышает предельно допустимые значения прочностных характеристик вмещающего грунта. Физические взрывы чаще всего связаны с неконтролируемым высвобождением потенциальной энергии сжатых газов из замкнутых объемов [11]. Основной причиной их образования является не химическая реакция, а физический процесс, обусловленный высвобождением внутренней энергии жидкости или газа за короткое время.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ВЗРЫВЫ ГИДРОЛАККОЛИТОВ

В 30-х годах XX в. В.И. Андреев, проводивший исследования на Ямале, сообщал, что, по

рассказам ненцев, в Байдарацкой тундре зимою со стороны бугра раздавался оглушительный треск (“взрыв”), после чего там нашли надземную наледь. В связи с этим автор предполагает, что подо льдом находилась полость, наполненная водой, а быть может, отчасти и газом, которые во время глубокого растрескивания бугров и выбрасывались на поверхность [1]. О.И. Баженова [3], рассматривая механизмы функционирования озерно-флювиальных систем Южного Забайкалья, приводит данные о взрывах гидролакколитов, сформировавшихся в озерных котловинах. Часто взрывы бугров сопровождаются сильным звуком, напоминающим оружейный выстрел, который слышен в радиусе 7-10 км. При этом возникают новые формы рельефа, представленные воронками взрыва. Диаметр воронок изменяется от 1 до 25 м, глубина составляет 2-5 м. Во время взрыва из воронок выбрасывается большой объем материала (около 508 м³). Самая большая глыба льда с прослоями песка, гравия и галечника имела толщину 2 м, ширину 6-9 и длину 18 м [22]. 27 июля 1938 г. взрывом родникового бугра пучения вблизи д. Бырца были подняты лед, песок и галечник на высоту 8-12 м и отброшены на расстояние 15 м [25]. 24 мая 1964 г. в 14 часов по местному времени в днище пади Арангот А.Н. Складневская наблюдала взрыв крупного гидролакколита, который был слышен на расстоянии до 6 км. Во время взрыва из центральной части бугра было выброшено большое количество песчано-дресвяного материала с глыбами льда, размер которых достигал 2×1.5×0.7 м, образовалась воронка продолговатой формы длиной 15, шириной 2-4 и глубиной около 2 м [4]. Рассмотренные примеры естественных взрывных процессов связаны с промерзанием водоносных горизонтов. Достичь наблюдаемой мощности данные взрывы могли только благодаря наличию газовой компоненты. Наличие сжимаемого газа позволяет накопить потенциальную энергию, реализующуюся в виде взрыва при давлениях, превышающих прочность кровли.

ТЕХНОГЕННЫЕ ВЗРЫВЫ В КРИОЛИТОЗОНЕ

С началом интенсивных поисков нефти и газа в Арктике были отмечены газопроявления, выражающиеся в выбросе бурового инструмента и шлама, дегазации промывочной жидкости и т.д. Так, в районе Анабаро-Хатангского междуречья отмечались газопроявления с глубин 70-120 м [32]. Геологоразведочные и подземные горные работы на вечномерзлых россыпных месторождениях Северо-Востока России часто сопровождались газопоявлениями с глубин до 100 м [30]. В 1986-1990 гг. на п-ве Ямал при изысканиях под мостовой переход через р. Юрибей было пробурено более 200

инженерно-геологических скважин глубиной от 10 до 53 м. Из большинства скважин наблюдались газопроявления [32]. При бурении неоднократно были зафиксированы выбросы песка и ледяной крошки, один раз произошел выброс бурового инструмента. Буровой снаряд общей массой около 150 кг был выброшен на расстояние 12 м от забоя. На одной из скважин газовый факел горел непрерывно более месяца, на других скважинах газ при поджигании давал кратковременные вспышки [2]. На Заполярном нефтегазоконденсатном месторождении (НГКМ) на севере Западной Сибири газопроявления отмечались при инженерно-геологическом бурении из неглубоких горизонтов криолитозоны (до 30 м). Мощность криолитозоны на территории месторождения достигает 500 м. По данным ОАО “Фундамент-проект”, на участке строительства УКПГ–2С Заполярного НГКМ при бурении инженерно-геологических скважин глубиной до 20 м были зафиксированы газопроявления из нескольких скважин, приуроченных к прослоям сыпучемерзлого песка в интервалах 13.0-13.8 и 14.0-14.5 м. Горение на устье скважины продолжалось около суток. По данным НТФ “КРИОС”, которая летом 2003 г. на Заполярном НГКМ проводила бурение мерзлотно-параметрических скважин глубиной 250 м, газопроявления из многолетнемерзлых пород были приурочены к интервалу пород 90-250 м [32]. На Тота-Яхинском месторождении (п-в Гыдан) при бурении скважины в 1986 г. с глубины 115 м был выброс 12 м³ бурового раствора, после чего факел на скважине горел в течение трех месяцев [32]. На Ямбургском газоконденсатном месторождении (ГКМ) при мощности криолитозоны до 450 м газопроявления отмечались с глубин 45-55 м [19]. Мощность криолитозоны на территории южной части Бованенковского ГКМ (северо-западной части п-ва Ямал) изменяется до 320 м. Более 85% газопоявлений в отложениях ямальской серии зафиксированы на глубинах около 60-80 м, а сам горизонт прослеживается на площади до 120 км² [15].

Значительное газосодержание в ММП зафиксировано не только на суше, но и под дном арктических морей. Мощный выброс газа из скважины на шельфе Печорского моря описан В.П. Мельниковым и др. Бурение производилось с судна при глубине воды 64 м. С глубины 50 м под дном моря при проходке многолетнемерзлой толщи глин произошел мощный выброс газа. Газо-водяной фонтан поднялся на 10 м выше палубы судна. Через 10 дней после события эхолотом на месте бурения был зафиксирован подводный газовый фонтан высотой 40 м и диаметром около 10 м. При поднятии кернов мерзлых глин шламовая рубашка образцов вспучивалась, лед растрескивался,

что объясняется разложением газовых гидратов, содержащихся в образцах [20].

Рассмотренные взрывные процессы не проявились бы без проникновения буровых скважин в толщу ММП. Данные взрывы были спровоцированы резким сбросом давления и повышением температуры на глубинах в интервале 14-120 м. Наиболее вероятной причиной выбросов большинство специалистов называют разложение гидратосодержащих мерзлых пород.

ВЗРЫВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ВОРОНОК ГАЗОВОГО ВЫБРОСА

В 2014 г. на Ямале в 30 км южнее Бованенковского НГКМ была обнаружена круглая воронка газового выброса (ВГВ) глубиной около 70 м. Непосредственно к воронке примыкал концентрический вал из выброшенной породы. Позже на севере Западной Сибири было найдено еще несколько воронок, близких по строению. К настоящему времени обнаружено 8 воронок (рис. 1).

ВГВ-1 (Центральный Ямал) – в 30 км к югу от Бованенковского НГКМ (рис. 2);

ВГВ-2 (Центральный Ямал) – в 20 км к северу от ВГВ-1 и 10 км к югу от Бованенковского НГКМ [6, 23] (рис. 3);

ВГВ-3 (Центральный Ямал) – в 10 км западнее воронки ВГВ-2 (рис. 4);

АнтВГВ (юго-запад Гыданского п-ва) – в 90 км от с. Антипаюта [14] (рис. 5);

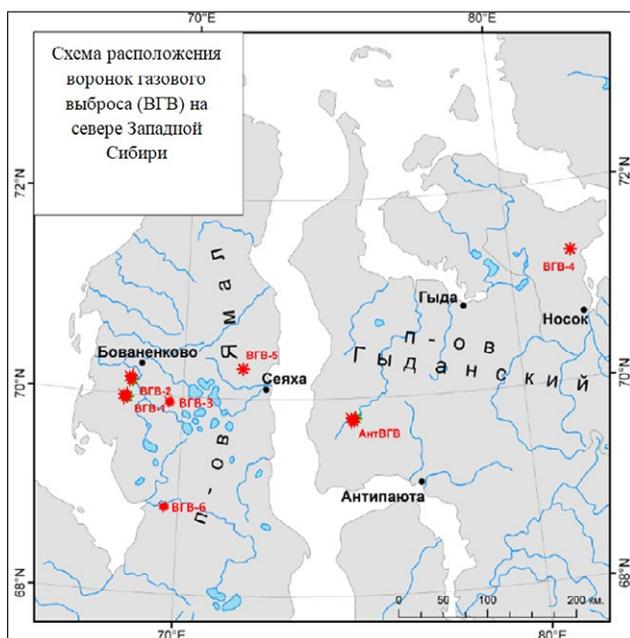


Рис. 1. Схема расположения ВГВ на севере Западной Сибири, составленная с использованием материалов [17, 7, 29].



Рис. 2. Воронка ВГВ-1. Фото В.В. Оленченко.

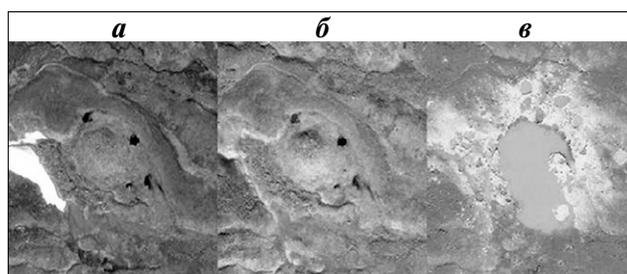


Рис. 3. Космические снимки воронки ВГВ-2: а — 4.07.2009 г., б — 30.07.2010 г., в — 21.07.2013 г. [8].

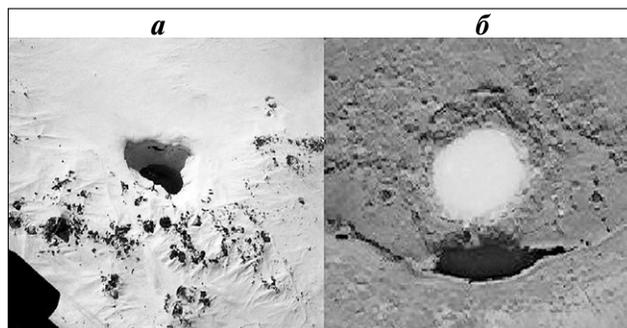


Рис. 4. Воронка газового выброса ВГВ-3: а — фотография из вертолета 27.04.2013 г. (фото С. А. Никитенко), б — космоснимок, август 2015 г. [8].



Рис. 5. Антипаютинская воронка. Фото Михаила Лапсуя.

ВГВ-4 (восточная часть п-ва Гыдан) – на юго-западном побережье Енисейского залива, на левом берегу р. Монгоче, поблизости от Дерябинского газового месторождения (рис. 6*а*); в непосредственной близости от воронки размеры обломков мерзлой породы и льда достигали размеров до 3х5 м;

ВГВ-5 (Северо-Восточный Ямал) – на расстоянии 34 км на северо-запад от с. Сеяха в пойме р. Морды-Яха. Газовый выброс сопровождался воспламенением, о чем свидетельствуют обуглившиеся песок и растительность на брусствере [10] (рис. 6*б*);

ВГВ-6 (Южный Ямал) обнаружена летом 2017 г. в пойме р. Еркута-Яха (рис. 7*а*), в 220 км на север от Салехарда;

воронка Осокина расположена на п-ве Ямал, координаты неизвестны (рис. 7*б*).

Анализ материалов исследования воронок газового выброса, обнаруженных на севере Западной Сибири, позволил сделать некоторые обобщения.

1. Все воронки приурочены к так называемым теплым ландшафтам.

ВГВ-1 расположена на стыке хасырея и нижней части склона, поросшего кустарником; ВГВ-2 – в долине ручья; ВГВ-3 и ВГВ-4 – на берегу водоема; Сеяхинский кратер (ВГВ-5) – непосредственно вблизи русла реки; Еркутинский кратер (ВГВ-6) – в пойме реки, вблизи старичного озера в полосе кустарника; Антипаютинский кратер (АнтВГВ) – на месте хорошо прогреваемого песчаного раздува, на бровке террасовой поверхности, разрушаемой термоэрозионными процессами; воронка Осокина – на днище ложбины, покрытой кустарником.

2. Все указанные воронки имеют округлую форму, размер большинства воронок 10-20 м в поперечнике и глубиной 20-70 м.

3. Во всех воронках (стенки или выброшенный материал) отмечается наличие льдистых пород или пластовых льдов.



Рис. 6. Обломки льдистой мерзлой породы выброшенной: *а* – из ВГВ-4 (апрель 2013 г. Фото Станислава Яптунэ), *б* – при образовании ВГВ-5 в долине р. Се-Яха (июль 2017 г. Фото представлено администрацией ЯНАО).



Рис. 7. *а* – Еркутинская воронка (ВГВ-6) в пойме р. Еркута-Яха (фото А. Соколова); *б* – воронка Осокина на п-ве Ямал (фото А. Осокина, 26.07.2013).

4. Вокруг всех воронок наблюдается концентрический разброс грунта. Радиус разброса может превышать 100 м, что свидетельствует о значительных давлениях при взрыве.

5. На некоторых участках (ВГВ-1, ВГВ-2, АнтВГВ, ВГВ-4, ВГВ-5, ВГВ-6) непосредственно перед взрывом было зафиксировано наличие бугров пучения высотой 2-6 м. Выявленное время существования бугров составляло от 2 лет (ВГВ-6) – до 70 лет (ВГВ-1). По косвенным данным (результаты дендрологических исследований, устные сообщения местных жителей), скорость роста бугров перед взрывом колебалась от 0.7 см/год (ВГВ-1) до 200 см/год (ВГВ-6).

6. В воронках (ВГВ-1, ВГВ-5), в которых удалось сделать анализ газового состава, обнаружен метан. Это совпадает с составом газа в многолетнемерзлых породах Бованенковского месторождения, отобранных в параметрических скважинах (содержание метана 98.4-99.9% [15]).

7. Некоторые взрывы сопровождались возгоранием газа (ВГВ-4, ВГВ-5).

По мнению специалистов, занимавшихся проблемой происхождения воронок (В.И. Богоявленского [5, 9], М.О. Лейбман, А.И. Кизякова [16], М. И. Эпова, Ельцова И.Н., Оленченко В.В. [31], С.Н. Булдовича, В.З. Хилимонюк [33], А.Н. Хименкова [27] и др.), своим происхождением они обязаны выбросам подземного газа. При этом на происхождение самого газа единого мнения пока не выработано. По генезису он может быть катагенетическим, поступающим из глубинных подмерзлотных горизонтов, или биохимическим, образующимся в результате жизнедеятельности микроорганизмов, и смешанным.

КРАТКИЙ ОБЗОР ГИПОТЕЗ ФОРМИРОВАНИЯ ВОРОНОК ГАЗОВОГО ВЫБРОСА

Гипотеза В.И. Богоявленского. Многолетнемерзлые породы являются хорошим региональным флюидоупором, препятствующим вертикальной миграции газа. Под действием неоднородности пластовых давлений происходит миграция газа в субгоризонтальном направлении с последующим прорывом на земную поверхность или в водную толщу через ослабленные зоны (разломы, термокарстовые озера с таликами, бугры пучения) [10]. По данным автора [10], ВГВ-1 и ВГВ-2 приурочены к зоне аномально высокого теплового потока. Данное утверждение требует серьезного обоснования. Результаты исследований наиболее изученного Ямальского кратера (ВГВ-1) показали присутствие мерзлоты под кратером [31, 21]. Следовательно, фильтрация газа должна осуществляться сквозь многолетнемерзлые породы, что необходимо доказать.

Гипотеза М.О. Лейбман. Положительный экстремум лета 2012 г. привел к повышению температуры в слое гидратосодержащих мерзлых пород, высвобождению газа при диссоциации газогидратов (в основном метана) и образованию воронок газового выброса [16]. Для обоснования данной гипотезы необходимо выяснить, может ли аномальный прогрев в течение 1-2-летних сезонов повлиять на разложение газогидратов, залегающих на глубине около 60 м, а также на накопление и движение газа в ММП. Измерения температуры грунтов в районе Марре-Сале показывают, что такие резких колебаний не наблюдается [12].

Гипотеза И.Д. Стрелецкой. По материалам исследования Ямальского кратера (ВГВ-1) высказано предположение, что метан мог концентрироваться и заполнять полость, которая фиксируется по наличию “грота”, прослеживающегося от дна кратера. При образовании воронки метан полностью вышел на поверхность и смешался с воздухом [24]. В этом случае необходимо обосновать механизмы формирования и возможность длительного существования грота высотой около 5 м и радиусом 2 м.

Гипотеза С.Н. Булдовича, В.З. Хилимонюк, А.Ю. Бычкова и др. Формирование Ямальского кратера связано с взрывным разрушением подозерного талика. Толщина мерзлых грунтов над таликом на момент его разрушения составляла от 7 до 9 м. Талик представлял собой водно-грунтовую газонасыщенную смесь с растворенным газом (в основном, углекислым) бактериального происхождения. Верхнюю часть талика занимал слой газа [33].

Криогенное извержение, вызванное термическими трещинами (ледяными клиньями) в замерзшей кровле, включало несколько стадий.

На первом этапе (который длился несколько минут) дегазация происходила в основном из верхней части талика: газ выделялся через трещины и расширялся адиабатно. На втором этапе (гидравлическом), который длился несколько часов, вода изливалась и дегазировалась, что приводило к взрывной восходящей миграции газовой смеси. Последняя стадия извержения незамерзшего грунта (от 5 до 25 часов) протекала при выделении газа из поровой воды в незамерзшей породе или из диссоциирующих гидратов углекислого газа. Гипотеза авторов базируется на анализе образцов, отобранных с глубин 10-17 м, и соответствует только верхней части кратера. Первоначальная глубина Ямальского кратера (ВГВ-1) составляла около 50 м. Распространение выводов, сделанных для верхней части кратера, на большие глубины требует дополнительного обоснования. В нижней части кратера также наблюдалось повышенное содержание метана [24, 18]. Содержание метана в воде озера, образовавшегося на месте кратера, в первые 3 года

наблюдений оставалось весьма высоким, что свидетельствует о наличии источника под дном озера [18]. При образовании воронок ВГВ-5 и ВГВ-6 произошло возгорание, что свидетельствует о присутствии метана. Данные факты противоречат предположению о ведущей роли разложения газогидратов углекислого газа при формировании воронок газового выброса, хотя для отдельных случаев такая возможность существует.

Гипотеза М. И. Эпова, И. Н. Ельцова, В. В. Оленченко и др. Причиной появления Ямальского кратера (ВГВ-1) стало разрушение газогидратов на глубине 60-80 м [31]. Источником повышенного теплового потока, который разогрел газогидраты в верхней части разреза, может быть крупная нефтегазоносная структура. Кроме того, на исследуемой площади были выявлены геоморфологические и геофизические признаки тектонических нарушений, в узле пересечения которых и расположен кратер.

Разложение газогидратов в толще мерзлых пород под действием теплового потока вполне возможно. Остается невыясненным, каким образом с глубины 60 м мерзлая порода могла быть выброшена на поверхность. По расчетам В.П. Мерзлякова [27], для выброса грунтового массива на данной глубине необходимо давление около 10 МПа. При разложении газогидратов при отрицательных температурах создаваемое давление не превышает 2.6 МПа [13]. Для других воронок повышенный тепловой поток не доказан. Поэтому данная гипотеза требует дальнейшего подтверждения.

Гипотеза авторов. Не отрицая различного генезиса газа, существования разных источников тепла и процессов, авторы предлагают рассмотреть иной механизм образования воронок газового выброса, который снимает указанные выше несоответствия. По нашим представлениям, основным источником газа, обуславливающим взрывные процессы в многолетнемерзлых грунтах, являются гидратосодержащие многолетнемерзлые породы, а источником теплового потока, выводящего их из равновесного состояния, – озера, широко распространенные в Западной Сибири [27]. Подготовка взрыва происходит в несколько этапов [28].

1. Исходная причина, вызвавшая все последующие события, – локальный прогрев толщи ММП. Под поверхностным водоемом формируются талик и зона растепления мерзлых пород с более высокими отрицательными температурами, чем в окружающих многолетнемерзлых породах. Под действием локального нагрева под водоемом температура мерзлых пород повышается в пределах отрицательных значений. В области локального прогрева ММП под озерами температуры пород находятся в диапазоне $-1^{\circ}\text{C} \dots -3^{\circ}\text{C}$.

2. После того, как температуры в слое газогидратов, залегающих на глубине 60-80 м [21], превысят значения, обеспечивающие их устойчивое состояние, начинается процесс диссоциации с выделением метана, с начальным давлением 2.2-2.6 МПа [13].

3. Газ, находящийся под давлением, начинает фильтроваться в наименее прочные высокотемпературные мерзлые породы, вызывая пластические и разрывные деформации льда и ледогрунта. Появившиеся трещины и дизъюнктивные дислокации ускоряют фильтрацию газа. Отвод газа (за счет фильтрации) из зоны диссоциации уменьшает давление в ней, что в свою очередь стимулирует процесс дальнейшего разложения газогидратов и выравнивает давление газа до начального уровня. Таким образом, обеспечивается фильтрация газа на значительное расстояние от первичного источника и формирование ледогрунтового газонасыщенного штока, пронизывающего массив ММП под водоемом. По всей высоте штока давление в пузырьках газа будет соответствовать тем же значениям, что и в зоне диссоциации. Высокое давление в газонасыщенном штоке вызывает его разуплотнение и смещение вверх относительно вмещающих низкотемпературных ММП.

4. Движение газонасыщенной ледогрунтовой массы вверх приводит к пластическим деформациям подозерных талых отложений, их выпучиванию и последующему промерзанию. В результате формируется низкотемпературный газонепроницаемый прочный 6-8-метровый слой мерзлой породы, развивается бугор пучения, являющийся экраном для движущегося снизу газового потока.

5. После того, как напряжения в мерзлой кровле достигнут предельной прочности, происходит ее разрыв и выброс ледогрунтового материала, насыщенного газом, находящимся под повышенным давлением [27, 28].

Различные начальные условия, а также разнообразие и интенсивность протекающих в период подготовки взрыва процессов обуславливают различные сценарии развития воронок газового выброса – от выхода газа в подозерный талик (в случае большого глубокого озера) до взрыва без образования бугра (в случае залегания газогидратов на небольшой глубине и их быстрого разложения).

ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОДОЕМА

Низкотемпературные многолетнемерзлые породы в естественных условиях газонепроницаемы. Тем не менее в результате внешних воздействий и при определенных условиях в них могут

формироваться газопроницаемые зоны. Одно из главных условий для этого — повышение температуры до значений, близких к фазовым переходам. В природе наиболее эффективным “нагревателем” являются поверхностные водоемы. Они обеспечивают быстрый прогрев многолетнемерзлых пород при своем появлении, а при их осушении породы быстро возвращаются в первоначальное температурное состояние. В случае формирования несквозного талика под водоемом формируется двучленное строение пород. Непосредственно под водоемом породы имеют положительную температуру (талики), ниже залегают высокотемпературные мерзлые породы. Данное утверждение можно проиллюстрировать материалами исследования оз. Иллисарвик, расположенного в дельте р. Маккензи. Размер озера 300×600 м, максимальная глубина 4.5 м. Среднегодовая температура мерзлых пород в окрестностях озера находится в диапазоне $-8^{\circ}\text{C} \dots -10^{\circ}\text{C}$; мощность мерзлоты — 400–600 м. В акватории озера пробурены 10 скважин глубиной от 15 до 87 м. В глубоководной части озера граница талых пород залегает на глубине около 24 м, ниже залегают мерзлые породы, температура которых понижается и на глубине ~ 90 м достигает -3°C [34].

Для севера Западной Сибири, где были обнаружены кратеры газового выброса, данных о температурах субаквальных осадков нет. Отопляющее влияние озера на ММП можно оценить, анализируя температуры в скважинах, пробуренных на хасыряях — днищах осушившихся озер. Температуры, замеренные на глубине 60–80 м, находятся в диапазоне $-3^{\circ}\text{C} \dots -2.5^{\circ}\text{C}$ на III морской террасе и $-1.8^{\circ}\text{C} \dots -1.6^{\circ}\text{C}$ на пойме, а вне зоны озер на III морской террасе и пойме находятся в диапазоне $-5.5^{\circ}\text{C} \dots -5^{\circ}\text{C}$ [15].

При локальном нагреве под поверхностным водоемом в мерзлых породах начинают происходить объемные тепловые деформации с развитием трещин. Прочность мерзлых пород и льдов уменьшается, увеличивается пористость, формируется достаточно развитая система фильтрационных каналов, связывающих между собой поры. В зоне нагрева происходит своего рода разгрузка пластического давления, а вместе с этим увеличивается газопроницаемость пород. Локальный нагрев ММП как бы “разрыхляет” ранее газонепроницаемую толщу. Таким образом, еще до появления источника газа в толще ММП формируются локальные условия для образования газонасыщенной зоны. Зоны нагрева под водоемами не только подготавливают мерзлые породы к возможности проникновения в них флюидов, но и обуславливают форму того пространства, где возможны эти процессы, — канал цилиндрической формы с повышенными температурами мерзлых пород. По

данным геофизических исследований, под озерами формируются вертикальные конусообразные зоны, в которых возникают дефектные зоны по границам кристаллов, увеличивается содержание незамерзшей воды, а газовые включения, расширяясь, образуют соединяющие их каналы [35].

ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ВОРОНОК ГАЗОВОГО ВЫБРОСА

В настоящее время основное внимание при изучении естественных взрывных процессов в криолитозоне уделяется стадии разрушения мерзлой кровли. Этот путь неконструктивен, поскольку базируется на рассмотрении лишь одного заключительного этапа развития воронок — газового выброса. Такой подход не позволяет выявить причины возникновения и историю развития естественных взрывных процессов в многолетнемерзлых грунтах даже при выявлении генезиса самого газа.

В независимости от генезиса газа и причин, вызывающих его перераспределение, происходит формирование саморазвивающейся газодинамической геосистемы, состоящей из нескольких связанных между собой зон: первичного формирования газа, области транзита и области накопления. Каждая зона соответствует определенной стадии перераспределения газа в ММП. Эта геосистема имеет четкие границы, определенную морфологию, свойства и структурные связи, определяемые индивидуальными особенностями строения ММП и неоднородностями температурного поля. Реализация всех стадий накопления газа приводит к взрыву.

Постепенно фильтрующийся газ образует единый поток, пронизывающий ледогрунтовой массив. Двигаясь по трещинам и микропорам, газ, находящийся под давлением, не только фильтруется сквозь мерзлую породу, но и деформирует ее. Перераспределение газа происходит неравномерно, что вызывает развитие пластических деформаций и нарушений сплошности. Общий вектор движения газа и льда направлен вверх. Это определяет формирование бугра пучения на поверхности.

В пределах флюидодинамической геосистемы формируется непрерывный фильтрационный поток — “единое фильтрационное пространство”, в котором газовый флюид из области с большим давлением фильтруется в область с меньшим давлением (как правило, с общим направлением к поверхности). В этом потоке газовые флюиды характеризуются макропараметрами (скоростью движения, давлением, температурой и др.). Неустановившееся “единое фильтрационное пространство” неоднородно, в различных его частях

возникают градиенты давления, обеспечивающие фильтрационный массоперенос в мерзлой породе. Вследствие этого газовый флюид оказывает силовое воздействие на стенки пор и трещин, что приводит к их расширению [26].

Жизненный цикл рассмотренной газодинамической геосистемы определяется многими факторами. Поэтому можно предположить, что у каждой геосистемы будет специфический сценарий развития, который при соответствующем соотношении внешних и внутренних факторов может приводить к образованию воронки газового выброса — заключительной фазе жизненного цикла данной геосистемы. Условия, при которых это происходит, рассмотрены авторами ранее [27, 28].

Выделение саморазвивающихся газодинамических геосистем в качестве основного объекта изучения взрывных процессов в криолитозоне позволит не только выявить динамику и направленность их развития, но и разработать научно обоснованную методику прогнозирования их поведения в будущем при глобальных климатических изменениях или техногенных воздействиях на криолитозону.

В настоящее время еще недостаточно знаний для построения единой теории образования такого сложного и многообразного класса явлений, как воронки газового выброса. Для этого потребуются нетривиальные и инновационные подходы, не укладывающиеся в русло традиционных представлений, существующих в геокриологии. В частности, решение может быть найдено в рамках концепции флюидодинамических геосистем в криолитозоне [27, 28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общепризнано, что оттаивание многолетнемерзлых пород вызовет значительное выделение парниковых газов в атмосферу. Приведенные в статье материалы показывают, что данный эффект может наблюдаться и в высокотемпературных многолетнемерзлых породах. Даже при незначительном повышении температуры в толщах гидратосодержащих ММП могут начаться разложение газогидратов, возникновение естественных взрывных процессов и выделение парниковых газов.

По мере освоения Арктики тепловое воздействие на многолетнемерзлые породы будет возрастать, опасность взрывных процессов для инженерных сооружений увеличится. Тем не менее данная группа процессов не только не учитывается при выборе проектных решений и в прогнозах взаимодействия инженерного сооружения с многолетнемерзлыми грунтами, но даже не включена в группу опасных геологических процессов.

В образовании воронок газового выброса большую роль играет миграция газовых флюидов сквозь мерзлые породы. Пока этот процесс практически не изучен. Для этого, в первую очередь, необходимо создание фильтрационно-деформационной модели, базирующейся на совместном рассмотрении процессов фильтрации газов и деформирования мерзлых массивов. Разработку данного направления затрудняет отсутствие соответствующей понятийно-терминологической базы, разработанных классификаций, систематизирующих признаков.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № г.р. АААА-А19-119021190077-6 и при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-05-00294) в части изучения фильтрации газа в многолетнемерзлых грунтах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.И. Гидролакколиты (булгунняхи) в Западно-Сибирских тундрах // Известия Государственного географического общества. 1936. Т. 68. Вып. 2. С. 186-210.
2. Арэ Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли. Т. II. № 4. 1998. С. 42-50.
3. Баженова О.И. Современная динамика озерно-флювиальных систем Онон-Торейской высокой равнины (Южное Забайкалье) // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 371. С. 171-177.
4. Богомолов Н.С., Скляревская А.Н. О взрывах гидролакколитов в южной части Читинской области // Наледи Сибири. М.: Наука, 1969. С. 127-130.
5. Богоявленский В.И. Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // Бурение и нефть. 2015. № 6. С. 4-10.
6. Богоявленский В.И., Мажаров А.В., Пушкарёв В.А., Богоявленский И.В. Выбросы газа из криолитозоны полуострова Ямал // Бурение и нефть. 2015. № 7. С. 8-13.
7. Богоявленский В.И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений нефти и газа в Арктике и в мировом океане // Ноосфера. 2016. №1. С. 48-67.
8. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А. Результаты аэрокосмических и экспедиционных исследований крупных выбросов газа на Ямале в районе Бованенковского месторождения // Арктика: экология и экономика. 2017. № 3 (27). С. 4-17.
9. Богоявленский В.И. Газогидродинамика в кратерах выброса газа в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2018. № 1 (29). С. 48-55.

10. *Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н., Никонов Р.А., Сизов О.С.* Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования выбросов газа на термокарстовых озерах // *Арктика: экология и экономика.* № 2 (34), 2019. С. 31-47.
11. *Девисилов В.А., Дроздова Т.И., Тимофеева С.С.* Теория горения и взрыва. Практикум: уче. пос. М.: Форум, 2012. 352 с.
12. *Дубровин В.А., Крицук Л.Н., Полякова Е.И.* Температура, состав и возраст отложений шельфа Карского моря в районе геокриологического стационара Марре-Сале // *Криосфера Земли.* 2015. Т. XIX. № 4. С. 3-16.
13. *Истомин В.А., Чувилин Е.М., Сергеева Д.В., Буханов Б.А., Станиловская Ю.В., Бадец К.* Влияние компонентного состава и давления газа на льдо- и гидратообразование в газонасыщенных поровых растворах // *НефтеГазоХимия.* 2018. №2. С. 33-42.
14. *Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Хомутов А.В., Дворников Ю.А., Лейбман М.А.* Оценка рельефообразующего эффекта образования Антипаутинской воронки газового выброса по данным спутниковой стереосъемки // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2017. Т. 14. № 4. С. 67-75.
15. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / Под общ. ред. Ю.Б. Баду, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М.: ООО Газпром экспо, 2013. 424 с.
16. *Лейбман М.О., Кизяков А.И.* Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // *Природа.* 2016. № 2. С. 15-24.
17. *Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Хомутов А.В. и др.* Водно-химические особенности воды озер и воронок газового выброса, вложенных в морские отложения севера Западной Сибири // *Геология морей и океанов: Матер. XXII Междунар. научной конф. (школы) по морской геологии.* Т. 4. М.: ИО РАН, 2017. С. 117-121.
18. *Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Стрелецкая И.Д., Хомутов А.В., Кизяков А.И., Ванштейн Б.Г., Семенов П.Б.* Связь формирования воронок газового выброса с эмиссией метана на севере Западной Сибири // *Дегазация Земли: геология и экология.* М.: Из-во ГМНГ им. И.М. Губкина, 2018. С. 1-3.
19. *Мельников П.И., Мельников В.П., Царев В.П., Дегтярев Б.В. и др.* О генерации углеводородов в толщах многолетнемерзлых пород // *Известия АН СССР, Сер. геологическая.* 1989. № 2. С. 118-128.
20. *Мельников В.П., Спесивцев В.И., Куликов В.Н.* О струйной дегазации углеводородов как источнике новообразований льда на шельфе Печорского моря // *Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике,* Новосибирск: Наука, 1997. С. 159-269.
21. *Оленченко В.В., Синицкий А.И., Антонов Е.Ю. и др.* Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования «Ямальский кратер» // *Криосфера Земли.* 2015. Т. XIX. № 4. С. 94-106.
22. *Петров В.Г.* Наледи на Амурско-Якутской магистрали. Л.: Изд-во АН СССР, 1930. 177 с.
23. *Сизов О.С.* Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // *Геоматика.* 2015. № 1. С. 53-68.
24. *Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О., Кизяков А.И., Облогов Г.Е. и др.* Подземные льды и их роль в формировании воронки газового выброса на полуострове Ямал // *Вестник Московского университета. Сер. 5: География.* 2017. Т. 1. № 2. С. 91-99.
25. *Стругов А.С.* Взрыв гидролакколита (Читинская область) // *Природа.* 1955. № 6. С. 117.
26. *Трофимов В.А.* Определение давления газа в угольном пласте // *Тр. Междунар. науч. симп. "Неделя горняка-2012".* М.: Горн. кн., 2012 (Горный информационно-аналитический бюллетень: отдельный вып.) С. 324-345.
27. *Хименков А.Н., Станиловская Ю.В., Сергеев Д.О., Власов А.Н. и др.* Развитие взрывных процессов в криолитозоне в связи с формированием Ямальского кратера // *Арктика и Антарктика.* 2017. № 4. С. 13-37.
28. *Хименков А.Н., Станиловская Ю.В.* Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера // *Арктика и Антарктика.* 2018. № 3. С. 1-25.
29. *Хомутов А.В., Кизяков А.И., Лейбман М.О., Дворников Ю.А.* Воронки газового выброса: в процессе изучения условий их формирования // *ХОЛОД'ОК! (15)* 2017. С. 5-13.
30. *Чабан П.Д.* О газовых гидратах в вечномерзлых россыпях // *Колыма.* 1991. № 6. С. 18-19.
31. *Эпов М.И., Ельцов И.Н., Оленченко В.В., Потапов В.В. и др.* Бермудский треугольник Ямала // *Наука из первых рук.* 2014. Вып. 5(59), С. 14-23.
32. *Якушев В.С.* Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009. 192 с.
33. *Buldovich S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y., Ospennikov E.N. et al.* Cryovolcanism on the earth: Origin of a spectacular crater in the Yamal peninsula (Russia) // *Scientific reports.* 2018. V. 8. 6 p. DOI:10.1038/s41598-018-31858-9
34. *Burges, M., Judge, A.S., Taylor, A., Allen, D.V.* Ground temperature studies of permafrost growth at

a drained lake site, Mackenzie Delta (MD) // Proc. of the 4th Canadian Permafrost Conferences, Calgary, AB, Canada, 1982. P. 3-11.

35. Majorowicz, J., Osadetz, K., Safanda, J. Models of Talik, Permafrost and Gas Hydrate Histories—Beaufort Mackenzie Basin, Canada // *Energies*. 2015. V. 8. Is. 7. P. 6738-6764. <https://doi.org/10.3390/en8076738>

REFERENCES

- Andreev, V.I. *Gidrolakkolity (bulgunnyakhi) v Zapadno-Sibirskikh tundrah* [Hydrolaccoliths (bulgunnyakhs) in the West Siberian tundra]. *Izvestiya gosudarstvennogo geograficheskogo obshchestva*, 1936, vol. 68, no. 2, pp. 186-210 (in Russian)
- Are, F.E. *Problema emissii glubinnykh gazov v atmosferu* [The problem of the emission of deep-seated gases into the atmosphere]. *Kriosfera Zemli*, vol. II, no. 4, 1998, pp. 42-50 (in Russian)
- Bazhenova, O.I. *Sovremennaya dinamika ozerno-flyuvial'nykh sistem Onon-Toreiskoi vysokoi ravniny (Yuzhnoe Zabaikal'e)* [Modern dynamics of lake-fluvial systems of the Onon-Torei High Plain (South Transbaikalia)]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 371, pp. 171-177 (in Russian)
- Bogomolov, N.S., Sklyarevskaya, A.N. *O vzryvakh gidrolakkolitov v yuzhnoi chasti Chitinskoi oblasti* [On the explosions of hydrolaccoliths in the southern part of the Chita region]. *Naledi Sibiri* [Icings in Siberia]. Moscow, Nauka, 1969, pp. 127-130 (in Russian)
- Bogoyavlenskii, V.I. *Vybrosy gaza i nefi na sushe i akvatoriyakh Arktiki i Mirovogo okeana* [Emissions of gas and oil on land and in the waters of the Arctic and the World Ocean]. *Burenie i nef'*, 2015, no. 6, 2015, pp. 4-10 (in Russian)
- Bogoyavlenskii, V.I., Mazharov, A.V., Pushkarev, V.A., Bogoyavlenskii, I.V. *Vybrosy gaza iz kriolitozony poluostrova Yamal* [Gas Emissions from the Yamal Peninsula Cryolithozone]. *Burenie i nef'*, 2015, no. 7, pp. 8-13 (in Russian)
- Bogoyavlenskii, V.I. *Prirodnyye i tekhnogennyye ugrozy pri osvoenii mestorozhdenii nefi i gaza v Arktike i v mirovom okeane* [Natural and human-induced threats in the development of oil and gas in the Arctic and in the World Ocean]. *Noosfera*, 2016, no. 1, pp. 48-67 (in Russian)
- Bogoyavlenskii, V.I., Bogoyavlenskii, I.V., Nikonov R.A. *Rezultaty aerokosmicheskikh i ekspeditsionnykh issledovaniy krupnykh vybrosov gaza na Yamale v raione Bovanenkovskogo mestorozhdeniya* [Results of aerospace and expeditionary studies of large gas emissions on Yamal in the area of the Bovanenkovo field]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2017, no. 3 (27), pp. 4-17 (in Russian)
- Bogoyavlenskii, V.A. *Gazogidrodinamika v kraterakh vybrosa gaza v Arktike* [Gas and hydrodynamics in gas explosion craters in the Arctic]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2018, no. 1 (29), pp. 48-55 (in Russian)
- Bogoyavlenskii, V.I., Bogoyavlenskii, I.V., Kargin, T.N., Nikonov, R.A., Sizov, O.S. *Degazatsiya Zemli v Arktike: distantsionnye i ekspeditsionnye issledovaniya vybrosov gaza na termokarstovykh ozerakh* [Degassing of the Earth in the Arctic: remote and field investigations of gas emissions in thermokarst lakes]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2019, no. 2 (34), pp. 31-47. (in Russian)
- Devisilov, V.A., Drozdova, T.I., Timofeeva, S.S. *Teoriya goreniya i vzryva. Praktikum: uchebnoye posobiye* [Theory of combustion and explosion. Workshop: study guide]. Moscow, Forum, 2012, 352 p. (in Russian)
- Dubrovin, V.A., Kritsuk, L.N., Polyakova, E.I. *Temperatura, sostav i vozrast otlozhenii shel'fa Karskogo morya v raione geokriologicheskogo stacionara Marre-Sale* [Temperature, composition and age of sediments of the Kara Sea shelf in the area of the Marre-Sale geocryological station]. *Kriosfera Zemli*, 2015, vol. 19, no. 4, pp. 3-16. (in Russian)
- Istomin, V.A., Chuvilin, E.M., Sergeeva, D.V., Bukhanov, B.A., Stanilovskaya, Yu.V., Badets, K. *Vliyaniye komponentnogo sostava i davleniya gaza na l'do- i gidratoobrazovaniye v gazonasyschennykh porovykh rastvorakh* [Influence of the composition and pressure of a gas on ice and hydrate formation in gas-saturated pore solutions]. *NefteGazoKhimiya*, 2018, no. 2, pp. 33-42. (in Russian)
- Kizyakov, A.I., Sonyushkin, A.V., Khomutov, A.V., Dvornikov, Yu.A., Leibman, M.A. *Otsenka rel'efoobrazuyushchego effekta obrazovaniya Antipayutinskoi voronki gazovogo vybrosa po dannym sputnikovoi stereos'emki* [Evaluation of the relief-forming effect of the formation of the Antipayutinskaya gas emission funnel using satellite stereo data]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli is kosmosa*, 2017, vol. 14, no. 4, pp. 67-75 (in Russian)
- Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdenii poluostrova Yamal. T. 2. Kriosfera Bovanenkovskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya* [Cryosphere of oil and gas condensate fields on the Yamal Peninsula. Vol. 2. Cryosphere of the Bovanenkovo oil and gas condensate field]. Badu, Yu.B., Gafarov, E.E., Podbornyi, E.E., Eds., Moscow, OOO Gazprom Expo, 2013, 424 p. (in Russian)
- Leibman, M.O., Kizyakov, A.I. *Novyi prirodnyy fenomen v zone vechnoi merzloty* [A new natural phenomenon in the permafrost zone]. *Priroda*, 2016, no. 2, pp. 15-24 (in Russian)
- Leibman, M.O., Dvornikov, Yu.A., Khomutov, A.V. *Vodno-khimicheskiye osobennosti vody ozer i voronok gazovogo vybrosa, vlozhennykh v morskoye otlozheniya*

- severa Zapadnoi Sibiri* [Hydrochemical features of lake water and gas funnels in the marine sediments of the north of Western Siberia]. *Geologiya morei i okeanov. Mater. XXII Mezhdunar. Nauchnoi konf. (shkoly) po morskoi geologii* [Geology of the seas and oceans. Proceedings of the XXII International Scientific Conference (school) on marine geology]. Moscow, 2017, vol. 4, pp. 117-121. (in Russian)
18. Leibman, M.O., Dvornikov, Yu.A., Streletskaya, I.D., Khomutov, A.V., Kizyakov, A.I., Vanshtein, B.G., Semenov, P.B. *Svyaz' formirovaniya voronok gazovogo vybrosa s emissiei metana na severe Zapadnoi Sibiri* [Connection of the formation of gas emission funnels with methane emission in the north of Western Siberia]. *Degazatsiya Zemli: geologiya i ekologiya* [Degassing of the Earth: geology and ecology]. Moscow, GMNG Publ., 2018, pp. 1-3. (in Russian)
 19. Mel'nikov, P.I., Melnikov, V.P., Tsarev, V.P., Degtyarev, et al. *O generatsii uglevodorodov v tolshchakh mnogoletnemerzlykh porod* [On the generation of hydrocarbons in the permafrost strata]. *Izvestiya AN SSSR, Ser. Geologicheskaya*, 1989, no. 2, pp. 118-128. (in Russian)
 20. Mel'nikov V.P., Spesivtsev, V.I., Kulikov, V.N. *O struinoi degazatsii uglevodorodov kak istochnike novoobrazovaniya l'da na shelfe Pechorskogo morya* [On jet degassing of hydrocarbons as a source of ice neoplasms on the shelf of the Pechora Sea]. *Itogi fundamental'nykh issledovaniy kriosfery Zemli v Arktike i Subarktike* [Results of the fundamental studies of the Earth's cryosphere in the Arctic and Subarctic]. Novosibirsk, Nauka, 1997, pp. 159-269. (in Russian)
 21. Olenchenko, V.V., Sinitskii, A.I., Antonov, E.Yu., et al. *Rezultaty geofizicheskikh issledovaniy territorii geologicheskogo novoobrazovaniya "Yamalskii krater"* [The results of geophysical studies of the territory of the geological neoplasm "Yamal crater"]. *Kriosfera Zemli*, 2015, vol. 19, no. 4, pp. 94-106 (in Russian)
 22. Petrov, V.G. *Naledi na Amursko-Yakutskoi magistrali* [Icings on the Amur-Yakutia highway]. Leningrad, AN SSSR Publ., 1930, 177 p. (in Russian)
 23. Sizov, O.S. *Distantsionnyi analiz posledstviy poverkhnostnykh gazoproyavlenii na severe Zapadnoi Sibiri* [Remote analysis of the effects of surface gas effects in the north of Western Siberia], *Geomatika*, no. 1, 2015, pp. 53-68. (in Russian)
 24. Streletskaya, I.D., Leibman, M.O., Kizyakov, A.I., Oblogov G.E., et al. *Podzemnye l'dy i ikh rol' v formirovaniy voronki gazovogo vybrosa na poluostrove Yamal* [Underground ice and its role in the formation of gas explosion funnels in the Yamal Peninsula]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya*, 2017, vol. 1, no. 2, pp. 91-99. (in Russian)
 25. Strugov, A.S. *Vzryv gidrolakkolita (Chitinskaya oblast)* [Hydrolaccolith explosion (Chita region)]. *Priroda*, 1955, no. 6, p. 117. (in Russian)
 26. Trofimov, V.A. *Opredeleniye davleniya gaza v ugol'nom plaste* [Determination of gas pressure in a coal seam]. Proc. of the Int. Scientific Symposium "Miner's Week 2012", 2012, vol. 1, pp. 324-345. (in Russian)
 27. Khimenkov, A.N., Stanilovskaya, Yu.V., Sergeev, D.O., Vlasov, A.N., et al. *Razvitiye vzryvnykh protsessov v kriolitozone v svyazi s formirovaniyem Yamal'skogo kratera* [The development of explosive processes in the cryolithozone in connection with the formation of the Yamal crater]. *Arktika i Antarktika*, 2017, no. 4, pp. 13-37. (in Russian)
 28. Khimenkov, A.N., Stanilovskaya, Yu.V. *Fenomenologicheskaya model formirovaniya voronok gazovogo vybrosa na primere Yamal'skogo kratera* [Phenomenological model of the formation of gas emission craters on the example of the Yamal crater]. *Arktika i Antarktika*, 2018, no. 3, pp. 1-25. (in Russian)
 29. Khomutov, A.V., Kizyakov, A.I., Leibman, M.O., Dvornikov, Yu.A. *Voronki gazovogo vybrosa: v protsesse izucheniya uslovii ikh formirovaniya* [Gas emission funnels: in the process of studying the conditions of their formation]. Kholod'ok Publ., 2017, no. 15, pp. 5-13. (in Russian)
 30. Chaban, P.D. *O gazovykh gidratakh v vechnomerzlykh rosspyyakh* [About gas hydrates in permafrost placers]. *Kolyma*, 1991, no. 6, pp. 18-19. (in Russian)
 31. Eпов, M.I., El'tsov, I.N., Olenchenko, V.V., Potapov, V.V., et al. *Bermudskii treugol'nik Yamala* [The Bermuda Triangle of Yamal]. *Nauka is pervykh ruk*, 2014, is. 5 (59), pp. 14-23. (in Russian)
 32. Yakushev, V.S. *Prirodnyi gaz i gazovye gidraty v kriolitozone* [Natural gas and gas hydrates in the cryolithozone]. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (in Russian)
 33. Buldovich, S.N., Khilimonyuk, V.Z., Bychkov, A.Y., Ospennikov, E.N., Vorobyev, S.A., Gunar A.Y., Gorskov, E.I. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a spectacular crater in the Yamal peninsula (Russia). *Scientific reports*, 2018, vol. 8, 6 p.
 34. Burges, M., Judge, A.S., Taylor, A., Allen, D.V. Ground temperature studies permafrost growth at a drained lake site, Mackenzie Delta (MD). Proc. of the 4th Canadian Permafrost Conferences, Canada, 1982, p. 3-11.
 35. Majorowicz, J., Osadetz, K., Safanda, J. Models of talik, permafrost and gas hydrate histories — Beaufort Mackenzie Basin, Canada. *Energies* 2015, no. 8, p. 6738-6764.

EXPLOSIVE PROCESSES IN THE PERMAFROST ZONE AS A NEW TYPE OF GEOCRYOLOGICAL HAZARD

© 2019 A. N. Khimenkov^{1,*}, D. O. Sergeev¹, A. N. Vlasov^{2,**}, D. B. Volkov-Bogorodskii²

¹*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

**E-mail: a_khimenkov@mail.ru*

²*Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences,
Leningradskii pr., 7, Moscow, 125040 Russia*

***E-mail: iam@iam.ras.ru*

The natural and human-induced explosive processes in the permafrost area were studied. A new approach is proposed to the theory of formation of gas emission funnels. It is based on the mechanism of migration of gas fluids from the gas hydrates dissociation zone to the overlying permafrost. The dissociation zone is formed in the areas of local heating due to the heat input from above. The preparation stages of the explosive process that formed the Yamal crater are shown. The preparation phases of natural explosive processes have been identified and characterized. Different scenarios are considered for the preparation of natural explosive processes in the cryolithozone. The main conclusions of the conducted research are the following: the explosions of hydrolaccoliths and the formation of gas emission funnels belong to one group of processes, i.e., physical explosions of natural origin; preparation of explosive processes in the permafrost goes through several stages; the migration of gas fluids plays an important role in the preparation of natural explosions in the permafrost. With the ongoing economic development of the Arctic, thermal effects on permafrost increase, and so does the hazard of explosive processes for engineering structures. However, this group of processes is not taken into account when choosing design solutions and predicting the interaction of an engineering structure with permafrost soils; moreover, these processes are even not included in the group of hazardous geological processes.

Keywords: *gas emission funnel, fluids, dissociation, gas hydrates, cryolithozone, physical explosion, transit zone, gas-saturated geosystems, developmental stages.*

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019630-41>