УДК 551.345; 544.454

# ПРИРОДНЫЕ ВЗРЫВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КРИОЛИТОЗОНЕ

© 2017 г. А.Н. Власов<sup>1</sup>, А.Н. Хименков<sup>1</sup>, Д.Б. Волков-Богородский<sup>2</sup>, Ю.К. Левин<sup>1</sup>

1Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт геоэкологии РАН им. Сергеева, г. Москва, Россия

Автор для переписки: А.Н. Хименков, e-mail: a\_khimenkov@mail.ru

#### Главное

- описаны два типа естественных взрывных процессов в многолетнемерзлых породах
- взрывы гидролакколитов и наледных бугров вызваны замерзанием воды замкнутых объемов
- второй тип выброс подземных газов при диссоциации газогидратов мерзлых пород
- рассмотрена стадийность протекания естественных взрывных процессов
- показаны особенности подготовки взрывных процессов при разложении газогидратов

Аннотация. Рассмотрены группы естественных взрывных процессов на территории распространения многолетнемерзлых пород. Одна группа описана давно и связана с промерзанием воды в замкнутых условиях (взрывы гидролакколитов и наледных бугров), другая выделена лишь недавно — в последние 3 года. Она связана с выбросом подземных газов, сформировавшихся при диссоциации газогидратов, которые содержатся в многолетнемерзлых породах. Причиной взрыва в обоих случаях является формирование избыточного давления в грунтовом массиве, содержащем свободную воду или газ. После того как давление превысит предел прочности кровли мёрзлых пород, происходит ее выброс. Можно отметить ряд общих черт при подготовке взрывных процессов в криолитозоне. Во-первых, это наличие локальной зоны, где сосредоточено вещество, формирующее взрыв: перемерзающее русло грунтового водного потока, зона концентрации воды в промерзающем грунтовом массиве, залегание газогидратов в мерзлом грунтовом массиве. Во-вторых, возникновение давления, сжимающего вещество. В-третьих, образование деформаций в перекрывающих породах. Если скорость нарастания давления небольшая и кровля успевает деформироваться, возникают пластические деформации. Это приводит к формированию бугров пучения, выраженных в рельефе. При быстром возрастании давления область пластических деформаций может не возникать. В-четвертых, это сам взрыв. По описанию многих авторов взрывное воздействие у объектов различного происхождения имеет общие черты: выброс газонасыщенной воды, газа, обломков грунта и льда, разбросанных на десятки, а иногда и на сотни метров. При разложении газогидратов в мерзлом грунте поначалу образуются микротрещины. Прорастая под достаточно высоким давлением высвобождаемого газа, они образуют поднимающиеся вверх субвертикальные каналы и вытянутые поры. Выходу на поверхность содержащемуся в них газу препятствует довольно прочная монолитная «крышка» (вышележащий слой ледогрунта). В результате невозможности его выхода на поверхность под «крышкой» образуется трещиновато-пористая структура мерзлого грунта. Затем с ростом давления в результате фильтрации газа от источника разложения газогидратов ширина раскрытия трещин и размер пор увеличивается. Они начинают сливаться, образуя полость, в которую продолжает фильтровать газ. При превышении предела прочности «крышка» не выдерживает напряжений, и накопившаяся потенциальная энергия газа в полости высвобождается (переходит в кинетическую) посредством взрыва. По мере освоения Арктики опасность взрывных процессов для инженерных сооружений будет возрастать. Тем не менее данная группа не только не учитывается при расчетах и прогнозах, но даже не включена в группу опасных геологических процессов.

Ключевые слова: криолитозона, газогидраты, гидролакколит, взрыв, воронка, стадийность, диссоциация

Цитируйте эту статью как: Власов А.Н., Хименков А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Левин Ю.К. Природные взрывные процессы в криолитозоне // Наука и технологические разработки. 2017, том 96, № 3, с. 41–56. [Тематический выпуск «Прикладная геофизика: новые разработки и результаты. Часть 1. Сейсмология и сейсморазведка»]. DOI: 10.21455/std2017.3-4

#### Введение

Данная публикация посвящена взрывным процессам в криолитозоне. Согласно ГОСТ Р 22.0.08-96 [ГОСТ..., 1996], взрыв — это «процесс выделения энергии за короткий промежуток времени, связанный с мгновенным физико-химическим изменением состояния вещества, приводящим к возникновению скачка давления или ударной волны, сопровождающийся образованием сжатых газов или паров, способных производить работу». Казалось бы, к низкотемпературным условиям многолетнемерзлых пород взрывы никакого отношения не имеют, тем не менее в криолитозоне существуют группы процессов, которые следует отнести к взрывным. Одна группа описана давно и связана с взрывами гидролакколитов и наледей, другая выделена в последние 3 года и связана с диссоциацией газогидратов, содержащихся в многолетнемерзлых породах.

Оба рассматриваемых процесса относятся к физическим взрывам, связанным с возникновением внутреннего давления в полости, заполненной жидкостью или газом, которое превышает предельно допустимые значения прочностных характеристик вмещающей среды. Физические взрывы чаще всего связаны с неконтролируемым высвобождением потенциальной энергии сжатых газов из замкнутых объемов [Девисилов и др., 2012]. К ним же следует отнести взрывы, формирующиеся при промерзании водного потока, и взрывы, происходящие при всестороннем промерзании воды в замкнутом объеме.

Основной причиной их образования является не химическая реакция, а физический процесс, обусловленный высвобождением внутренний энергии жидкости или газа за короткое время. Физические взрывы не сопровождаются химическими реакциями с выделением энергии, они являются следствием перехода запасенной потенциальной энергии в кинетическую энергию движения газов и жидкостей. После того когда замкнутая полость с содержащимся газообразным или жидким веществом при повышенном давлении разрушается, происходит выброс этого вещества с генерацией волн давления. При этом потенциальная энергия сжатого газа или жидкости переходит в энергию ударной волны. Рассмотрим некоторые примеры реализации физических взрывов в криолитозоне.

#### Взрывы гидролакколитов

В геокриологии взрывные процессы в естественных условиях известны давно. Связаны они в большинстве случаев с взрывами гидролакколитов и наледных бугров. Образование и взрывы гидролакколитов обусловлено, как правило, промерзанием несквозных подозерных таликов и возникновением напорных подземных вод. В некоторых случаях такие взрывы наблюдались и в сезонноталом слое.

В 1930-х годах В.И. Андреев [1936], проводивший исследования на Ямале, сообщал, что, по рассказам ненцев, в Байдарацкой тундре зимою со стороны бугра раздавался оглушительный треск («взрыв»), после чего здесь находили надземную наледь. В связи с этим автор предполагал, что подо льдом находится полость, наполненная водой, а, быть может, отчасти и газом, которые во время глубокого растрескивания бугров и выбрасываются на поверхность.

О.И. Баженова [2013], рассматривая механизфункционирования озерно-флювиальных МЫ систем Южного Забайкалья, приводит данные о взрывах гидролакколитов, сформировавшихся в озерных котловинах. Гидролакколиты формируются на северных побережьях озер, имеют овальную форму, высоту 1.5-2.5 м, длину 50-100 м. Взрывы происходят не только зимой и весной, но и летом. Они отмечаются в руслах, на поймах и террасах рек и озер, близ выходов родников в днищах падей вдоль их северных бортов. Часто взрывы бугров сопровождаются сильным звуком, напоминающим орудийный выстрел, который слышен в радиусе 7-10 км. При этом возникают новые формы рельефа, представленные воронками — кратерами взрыва. Диаметр воронок изменяется от 1 до 15-25 м, глубина со-



Рис. 1. Сопоставление размеров структурных элементов растущего гидролакколита (пинго) на Севере Аляски [Mackay, 1979] и Ямальского кратера [Leibman et al., 2014]

**Fig. 1.** Comparison of the structural element sizes of the growing hydrolactolite (pingo) in the North of Alaska [Mackay, 1979] and the Yamal Crater [Leibman et al., 2014]

ставляет 2–5 м. Во время взрыва из воронок выбрасывается большой объем льда и грунта.

Для Забайкалья имеются сведения еще о ряде случаев наблюдений взрывов гидролакколитов. Так, 28 марта 1927 г. произошел взрыв наледного бугра в долине р. Онон, общий объем льдогрунтовой массы, выброшенной взрывом, составил 508 м<sup>3</sup>. Самая большая глыба льда с прослоями песка, гравия и галечника имела толщину 2 м, ширину 6–9 и длину 18 м [Петров, 1930]. Взрывом родникового бугра пучения вблизи д. Бырца 27 июля 1938 г. лед, песок и галечник были подняты на высоту 8–12 м и отброшены на расстояние 15 м. Фонтан воды высотой 2 м функционировал около 2 ч. В результате взрыва образовалась воронка диаметром 4.5 м и глубиной 4 м [Стругов, 1955].

В днище пади Арангот 24 мая 1964 г. в 14 ч по местному времени А.Н. Скляревская наблюдала взрыв крупного гидролакколита (размеры  $30 \times 50$  м при высоте 2.5 м, лед залегал с глубины 0.35 м), 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  $2 \times 1.5 \times 0.7$  м. В результате взрыва образовалась продолговатой формы воронка длиной 15 шириной 2-4 и глубиной около 2 м [Богомолов, Скляревская, 1969].

Н.С. Богомолов 20 июля 1964 г. наблюдал взрыв гидролакколита в долине р. Урейки (левый приток Акши). Ширина основания бугра была 18–20 м, высота 0.8–1 м. Гидролакколит разорвался с грохотом, после которого последовало шумное извержение громадного количества воды в виде столба размером 3×2.5×1.7 м с дебитом 12 м<sup>3</sup>/с, продолжавшееся 15 мин [Богомолов, Скляревская, 1969].

Размеры гидролакколитов изменяются в больших пределах: диаметр основания от 20 до 250 м, а высота — от 2 до 70 м. Кровля бугров обычно состоит из переслаивающихся льдистых суглинков и супесей мощностью 2-10 м, под которыми залегает ледяное ядро мощностью в несколько десятков метров (до 60 м) [Mackay, 1998]. Растущие гидролакколиты подстилаются талыми водоносными горизонтами или водяными линзами мощностью до 2 м, обладающими гидравлическим напором. На рис. 1 схема строения растущего гидролакколита на Севере Аляски [Mackay, 1979] сопоставлена со схемой Ямальского кратера Leibman et al., 2014].

Возрастание напора в линзе воды приводит к разрыву кровли, который сопровождается



извержениями фонтанов воды или жидкой грязи в несколько метров высотой, а иногда они представляют собой взрывы, разбрасывающие обломки кровли и льда на десятки метров вокруг. Судя по приведенным Дж. Маккеем данным, давление в водяной линзе (по высоте столба воды) составляет около 25 атм.

Несмотря на то, что взрывы гидролакколитов связаны с промерзанием водоносного горизонта, следует отметить, что в данном процессе всегда присутствует газовая составляющая. Это связано с тем, что при льдообразовании всегда выделяется газ, растворенный в воде.

# Формирование воронок газового выброса

В 2014 г. на Ямале была обнаружена воронка, получившая название «Ямальский кратер» [Leibman et al., 2014; Эпов и др., 2014; Кизяков и др., 2015]. Глубина воронки около 50, ширина около 30 м (рис. 2, 3). Разбросанный вокруг грунт свидетельствовал о взрыве, сопровождавшем ее образование. Никаких следов хозяйственной деятельности вблизи воронки не обнаружено. Воронка расположена в юго-западной части полуострова Ямал, в 30 км южнее Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ). Форма кратера — правильный эллиптический цилиндр, немного pacширенный у поверхности.

Измерения показали, что большая полуось воронки составляет около 20 м, малая — 14 м. Глубина сезонно-талого слоя по периметру составила 0.8 м. Материал, выброшенный из воронки, распределен равномерно во всех направлениях. Наибольшая концентрация обломков была обнаружена по окружности на расстоянии 140 м от центра воронки, а отдельные обломки разлетались на расстояние более 180 м. Разрез воронки сложен практически чистым льдом. В выброшенном материале обнаружены камни — окатанные песчаники, сланцы [Эпов и др., 2014].

Позже на севере Западной Сибири было обнаружено еще несколько воронок, близких по строению Ямальской. Морфология воронок имеет ряд общих черт. Их верхняя часть, как правило, расширена и имеет коническую форму. Центральная часть более узкая, во многих случаях имеет форму цилиндра с гладкими стенками. По морфологии и морфометрии они резко отличаются от гидролакколитов (см. рис. 1).

Большинство исследователей (например, В.П. Мельников, В.И. Богоявленский, М.О. Лейбман, А.И. Кизяков, В.В. Оленченко, М.И. Эпов, И.Н. Ельцов и др.), изучавших данные образования, сходятся во мнении, что их формирование обусловлено выбросом га-



Рис. 2. Параметры воронки газового выброса на п-ове Ямал (Ямальский кратер) [Leibman et al., 2014]

Fig. 2. Parameters of the gas discharge crater on the Yamal Peninsula (Yamal Crater) [Leibman et al., 2014]



Рис. 3. Принципиальная схема строения воронки газового выброса на п-ве Ямал (Ямальский кратер) [Кизяков, 2015]: 1 — внешний контур бруствера; 2 — бровки воронки; 3 — материал бруствера; 4 — раструб воронки; 5 — стенки 08.11.2014 г.; 6 — цилиндрическая часть воронки; 7 — стенки 16.07.2014 г.; 8 — грот; 9 — вода озера на дне воронки

**Fig. 3.** Schematic diagram of the structure of the gas discharge crater on the Yamal Peninsula (Yamal Crater) [Kizyakov, 2015]: *1* — outer contour of the rampart; *2* — edge of the crater; *3* — material of the rampart; *4* — crater mouth; *5* — walls on November 08, 2014; *6* — cylindrical part of the crater; *7* — walls on July 16, 2014; *8* — grotto; *9* — lake water at the bottom of the crater

зов, сформировавшихся при разложении газогидратов, входящих в состав многолетнемерзлых пород. Это дало основание В.И. Богоявленскому и И.А. Гарагашу [2015] рассматривать данные образования как воронки газового выброса.

В настоящее время изучение воронок газового выброса находится еще в начальной стадии. Ниже приводятся некоторые сведения, иллюстрирующие многообразие процессов, связанных с их формированием.

Пластические деформации кровли мерзлых пород. В зоне диссоциации газогидратов формируются области повышенных давлений, превышающего литостатическое. Это приводит к пластическим деформациям многолетнемерзлых пород и формированию бугров пучения на поверхности. На рис. 4 показано строение мерзлых пород в стенке кратера, образовавше-

Наука и технологические разработки, 2017, том 96, № 3, с. 41–56 гося после взрыва разрушившего многолетний бугор пучения (см. рис. 2). В центральной части фотографии видны остатки фрагмента газонасыщенного льда, деформирующего первичную слоистость перекрывающих мерзлых пород.

Течение флюидов газов сквозь мерзлую толщу. При исследовании воронок, связанных с диссоциацией газогидратов, было обнаружено новое явление, связанное с формированием газовых флюидов и их миграцией сквозь льдистую мерзлую толщу. На фотографии, сделанной в ноябре 2014 г. в нижней части Ямальского кратера (рис. 5), хорошо видны потоки газовых флюидов. Нижние их части соответствуют зоне залегания газогидратного слоя [Эпов и др., 2014]. Мигрируя под напором из зоны диссоциации в перекрывающие горизонты многолетнемерзлых пород, флюиды насыщают их газом и



**Рис. 4.** Деформация кровли слоистых суглинков над областью диссоциации газовых гидратов (Ямальский кратер), июль 2015 (фото В.И. Богоявленского)

**Fig. 4.** Deformation of the roof of layered loams over the region of dissociation of gas hydrates (Yamal Crater), July 2015 (photo by V.I. Bogoyavlenskiy)

формируют газонасыщенные ледовогрунтовые штоки [Хименков и др., 2017].

Формирование штока газонасыщенного льда над зоной диссоциации газогидратов. Как уже отмечалось выше, большинство исследователей, изучающих естественные взрывы в многолетнемерзлых породах на севере Западной Сибири, считают, что их причиной является сжатие газов, образовавшихся при диссоциации газогидратов (см., например, [Leibman, et al., 2014; Кизяков и др., 2015] и др.) или газов, поступающих с больших глубин (см. например, [Богоявленский, 2015; Богоявленский, Гарагаш, 2015] и др.). При этом не объясняется, каким образом происходят миграция газа и его накопление в мерзлых породах.

Анализ опубликованных в научной литературе материалов позволил нам высказать некоторые предположения по данным проблемам. На рис. 6 представлена фотография стенки Ямальского кратера. На ее поверхности, на протяжении нескольких десятков метров по высоте, располагаются многочисленные ячейки. Они образуют скопления, иногда прослеживаются вертикально ориентированные цепочки. Размер ячеек составляет от 2–3 до 30–40 см. Ячейки распределены по всему периметру кратера. В нижней части кратера они контактируют с зоной газовых флюидов (рис. 5). Не имея возможности вытеснить залегающую выше толщу мерзлой породы, газовые флюиды проникают в нее по ослабленным зонам.

При слиянии флюидов формируются формируют газовые пузыри. Давление, возникающее в газовых пузырях, соответствует повышенному давлению в зоне диссоциации и постоянно поддерживается поступлением новых порций газа. Через некоторое время над зоной диссоциации газогидратов формируется шток газонасышенного ледогрунта, который начинает выдавливать вышележащие мерзлые породы (см. рис. 4) [Хименков и др., 2017].

Хрупкое разрушение мерзлой кровли при взрыве.

Во всех обнаруженных воронках, связанных с разложением газогидратов, наблюдаются следы хрупкого разрушения многолетнемерзлых пород. Особенно ярко это прослеживается на примере воронки, расположенной на юго-западном побережье Енисейского залива, на левом берегу р. Монгоче, поблизости от пос. Носок (рис. 7–9).

По описанию местных оленеводов, в верхней части воронка имеет коническую форму шириной около 10 м. На глубине около 3 м диаметр воронки уменьшается до 4 м, при этом воронка имеет цилиндрическую форму. Глубину воронки оценивают в 60–100 м. Вокруг воронки концентрически разбросаны глыбы льда и мерзлых пород на расстояние до 100 м. Вблизи воронки размеры обломков достигают 5–8 м.

Формирование каверн и гротов в зоне разложения газогидратов. После взрыва в зоне диссоциации газогидратов остается серия каверн и гротов



**Рис. 5.** Флюиды в нижней части Ямальского кратера (фото В.А. Пушкарева) **Fig. 5.** Fluids in the lower part of the Yamal Crater (photo by V.A. Pushkarev)



Рис. 6. Газонасыщенный лед над зоной разложения газогидратов, Ямальский кратер, июль 2014 г. (фото В.И. Богоявленского)

Fig. 6. Gas-saturated ice over the decomposition zone of gas hydrates, Yamal Crater, July 2014 (photo by V.I. Bogoyavlenskiy)

Наука и технологические разработки, 2017, том 96, № 3, с. 41—56



Рис. 7. Воронка газового выброса около пос. Носок (фото Станислава Яптунэ) Fig. 7. Crater of gas discharge near the settlement Nosok (photo by Stanislav Yaptune)



Рис. 8. Глыбы льда, разбросанные вокруг воронки около пос. Носок (фото Станислава Яптунэ) Fig. 8. Lumps of ice scattered around the crater near the settlement Nosok (photo by Stanislav Yaptune)

(рис. 10) размером от десятков сантиметров до нескольких метров. По мере вытаивания, мелкие каверны и гроты сливаются, образуя большие гроты с гладкими стенками. Аналогичные образования обнаружены в зонах выбросов газа (за счет разложения газогидратов) в окрестностях острова Беннетта (Новосибирские острова) и в Охотском море. Здесь, в районе газового фонтана, обнаружены такие характерные формы, как провальные воронки, ямы, поддонные ниши и пещеры, образующие систему сообщающихся гротов [Дядин, Гущин, 1998].

Концентрические просадки поверхности после взрыва. Взрывные процессы не всегда сопровождаются формированием бугров пучения. На фотографии (рис. 11), сделанной в июне



Рис. 9. Глыбы льда в непосредственной близости от воронки около пос. Носок (фото Станислава Яптунэ)

Fig. 9. Lumps of ice in the vicinity of the crater near the settlement Nosok (photo by Stanislav Yaptune)



**Рис. 10.** Каверны и гроты в зоне разложения газогидратов Ямальского кратера, июль 2014 г. (фото В.А. Пушкарева)

**Fig. 10.** Cavities and grottoes in the zone of decomposition of gas hydrates of the Yamal Crater, July 2014 (photo by V.A. Pushkarev)

2013 г. в районе Бованенковского газоконденсатного месторождения (п-в Ямал), изображена взрывная воронка естественного происхождения размерами примерно 15×30 м и глубиной около 20–30 м. Она расположена на ровной поверхности широкой ложбины. Никаких следов образования бугра пучения поблизости не обнаружено.

Вокруг воронки наблюдается серия концен-

НАУКА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ, 2017, том 96, № 3, с. 41–56

трических трещин, связанных с просадками. Наличие концентрических трещин свидетельствует о том, что перед взрывом в толще многолетнемерзлых пород сформировалась область повышенного давления, значительно превышающая по площади размеры воронки. Можно предположить, что эта область была заполнена газом или водой. После взрыва подвижные ком-



Рис. 11. Воронка на п-ве Ямал, 26.07.2013 (фото А. Осокина) Fig. 11. Crater on the Yamal Peninsula, July 26, 2013 (photo by A. Osokin)

поненты были выброшены на поверхность и поверхность вокруг воронки просела.

# Обсуждение результатов

Рассмотренные процессы — взрывы гидролакколитов и образование воронок газового выброса — реализуются при разнонаправленных тенденциях развития многолетнемерзлых толщ. Первая группа процессов происходит при промерзании внутригрунтового талика, вторая — при повышении температуры многолетнемерзлых толщ до значений, обеспечивающих начало диссоциации содержащих в них газогидратов. Несмотря на это, между процессами разных групп много общего: это и общность субстрата, в котором они развиваются — мерзлые породы, и уровень избыточного давления, необходимый для протекания процесса (для гидролакколитов зафиксированы значения 25 кг/см<sup>2</sup>, для воронок газового выброса получено расчетное значение около 30 кг/см<sup>2</sup>), в обоих случаях наблюдаются выбросы льда и ледогрунта.

При этом основным объединяющим фактором является тот факт, что причиной взрыва в том и другом случаях является формирование избыточного давления в грунтовом массиве, содержащем свободную воду или газ. После того как давление превысит предел прочности кровли мерзлых пород, происходит ее выброс. Можно выделить ряд общих черт при подготовке взрыв-

ных процессов в криолитозоне.

- Наличие локальной зоны, где сосредоточено вещество, формирующее взрыв, — перемерзающее русло грунтового водного потока, зона концентрации воды в промерзающем грунтовом массиве, залегание газогидратов в мерзлом грунтовом массиве.
- 2. Возникновение давления, сжимающего вещество.
- Образование деформаций в перекрывающих породах. Если скорость нарастания давления небольшая и кровля успевает деформироваться, то возникают пластические деформации. При этом формируются бугры пучения, выраженные в рельефе. При быстром возрастании давления область пластических деформаций может не возникать.
- 4. Собственно взрыв. По описанию многих авторов взрывное воздействие у объектов различного происхождения имеет общие черты: выброс газонасыщенной воды, газа, обломков, разбросанных на десятки, а иногда и на сотни метров. В случае диссоциации газогидратов могут формироваться ледяные штоки, насыщенные газом и находящиеся под давлением. Движение штоков к поверхности может приводить к формированию бугров пучения и последующему взрыву.

Газовые гидраты представляют собой твердые кристаллические соединения молекул газа и воды. При диссоциации 1 м<sup>3</sup> газовых гидратов выделяется до 180 м<sup>3</sup> газа и 0.8 м<sup>3</sup> воды. По оценкам некоторых ученых, не менее 1400 гигатонн углерода в настоящий момент заперто в виде метана и гидратов метана под арктической подводной вечной мерзлотой, и 5–10 процентов от этого количества тает через открытые проталины в этой вечной мерзлоте.

Специалисты приходят к выводу, что «резкое высвобождение вплоть до 50 гигатонн гидратов весьма вероятно в любой момент». Такой резкий выброс увеличит содержание метана в атмосфере в 12 раз, что будет эквивалентно по парниковому эффекту удвоению текущего уровня CO<sub>2</sub>. Это указывает на актуальность рассматриваемой проблемы.

Как отмечалось ранее, физические взрывы являются следствием перехода запасенной потенциальной энергии в кинетическую энергию движения газов и жидкостей. Этот процесс подчиняется фундаментальным закономерностям. В частности, необходимо соблюдение принципа минимизации энергии системы, известного как «энергетический принцип» Ляпунова: «Состояние устойчиво, если энергия в нем минимальна». Однако часто бывает так, что на пути перехода из одного состояния системы в другое, пусть даже с более низкой энергией, есть потенциальный барьер, т.е. система вынуждена сохранять квазиустойчивое энергетически невыгодное состояние до тех пор, пока не найдется энергия для преодоления энергетического барьера. Например, в случае «гремучего газа» — смеси водорода с кислородом в соотношении 2:1 — необходима начальная энергия искры, чтобы запустить цепную реакцию превращения смеси кислорода с водородом в воду.

В ходе этой реакции, в соответствии с законом сохранения энергии, выделяется энергия, равная разности энергии системы в начальном и конечном состоянии. Это проявляется в увеличении кинетической (упорядоченное движение молекул) и тепловой (неупорядоченное движение молекул) энергии исходных веществ. В конечном итоге система переходит из газообразного состояния в конденсированное.

Аналогичное, точнее, прямо противоположное явление происходит при диссоциации газовых гидратов. В этом случае система из конденсированного (твердого) состояния переходит в газообразное (метан и пары воды). При этом высвобождается энергия сжатого газа в виде энергии ударных волн и теплового движения (температуры) молекул. При разложении газогидратов в мерзлом грунте поначалу образуются микротрещины. Прорастая под достаточно высоким давлением высвобождаемого газа, они образуют поднимающиеся вверх субвертикальные каналы и вытянутые поры. Выходу на поверхность содержащемуся в них газу препятствует довольно прочная монолитная «крышка» (вышележащий слой ледогрунта). В результате невозможности его выхода на поверхность под крышкой образуется трещиновато-пористая структура мерзлого грунта.

Затем с ростом давления в результате фильтрации газа от источника разложения газогидратов [Savatorova et al., 2015, 2016; Власов и др., 2016] ширина раскрытия трещин и размер пор увеличиваются. Они начинают сливаться, образуя полость, в которую продолжает поступать газ. В результате пластических деформаций под давлением размеры полости увеличиваются со значительным преобладанием в вертикальном направлении. При этом крышка выгибается, образуя бугор пучения. Рост полости также происходит и за счет сопутствующих процессов, например таяния мерзлого грунта, ограничивающего полость, и его последующего осыпания.

При этом давление в полости может падать. За счет продолжающегося процесса разложения газогидратов и фильтрации газа в полость в ней растет давление. Это приводит к тому, что крышка не выдерживает напряжений, и накопившаяся потенциальная энергия газа в полости высвобождается (переходит в кинетическую) посредством взрыва.

Эксплуатация кустов газодобывающих скважин с положительной температурой оказывает значительное отепляющее воздействие на мерзлую толщу, что сопровождается образованием цилиндрических ореолов оттаивания на значительном расстоянии от ствола скважины. Результаты математического моделирования теплового взаимодействия эксплуатационных скважин Бованенковского НГКМ показали, что максимальная зона теплового влияния скважин на толщу многолетнемерзлых пород через 25 лет их эксплуатации может достигать 50 м и более [Грива, 2006].

Значительное воздействие на температурный режим многолетнемерзлых пород оказывают подземные трубопроводы. Вокруг трубопроводов с положительной температурой транспортируемого продукта могут образовываться техногенные талики размером от 1–2 м до 5–6 м, что сопровождается термокарстовыми просадками и формированием водоемов на поверхности

НАУКА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ, 2017, том 96, № 3, с. 41–56

[Грива, 2006]. Прямое тепловое воздействие на массив многолетнемерзлых пород оказывают здания и сооружения, среди которых наиболее мощным источником теплопотоков являются аппараты воздушного охлаждения газа. На действующих газопромышленных объектах Ямбургского и Медвежьего месторождений кровля многолетнемерзлых пород в основании этих аппаратов понизилась до 7.5–8 м [Грива, 2006].

Учитывая то обстоятельство, что газогидраты в многолетнемерзлых породах часто залегают на глубине в несколько десятков метров, следует признать, что опасность начала диссоциации газогидратов и формирования условий для развития воронок газового выброса достаточно велика.

#### Заключение

Теория взрывных процессов в криолитозоне в настоящее время не разработана. Она даже не сформулирована. Между тем хозяйственное освоение области криолитозоны усиливается. Риски для инженерных сооружений от воздействия опасных криогенных процессов в будущем будут только возрастать. А взрывные процессы в области распространения многолетнемерзлых пород даже не включены в перечень опасных криогенных процессов [Природные..., 2000].

# БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-05-00294.

# Литература

- Андреев В.И. Гидролакколиты (булгунняхи) в Западно-Сибирских тундрах // Известия Государственного географического общества. 1936. Т. 68, вып. 2. С. 186–210.
- Баженова О.И. Современная динамика озерно-флювиальных систем онон-торейской высокой равнины (Южное Забайкалье) // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 371. С. 171–177.
- Богомолов Н.С., Скляревская А.Н. О взрывах гидролакколитов в южной части Читинской области // Наледи Сибири. М.: Наука, 1969. С. 127–130.
- Богоявленский В.И. Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // Бурение и нефть. 2015. № 6. С. 4–10.
- Богоявленский В.И., Гарагаш И.А. Математи-ческое моделирование процесса образования крате-

ров газового выброса в Арктике // Арктика. Экология и экономика. 2015. № 3. С. 12–17.

- Власов А.Н, Саваторова В.Л., Талонов А.В. Использование метода многомасштабного усреднения для описания процессов массопереноса в геоматериалах органического происхождения // Механика композиционных материалов и конструкций. 2016. Т. 22, № 3. С. 362–377.
- ГОСТ Р 22.0.08-96. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Взрывы. Термины и определения. М.: ИПК Издательство стандартов, 1996.
- *Грива Г.И.* Геоэкологические условия разработки газовых месторождений полуострова Ямал: автореф. дисс. ... д-ра геол.-мин. наук. Надым, 2006. 41 с.
- Девисилов В.А., Дроздова Т.И., Тимофеева С.С. Теория горения и взрыва. Практикум: учебное пособие. М.: ФОРУМ, 2012. 352 с.
- Дядин Ю.А., Гущин А.Л. Газовые гидраты // Соросовский Образовательный журнал. 1998. Вып. 3. С. 55–64.
- 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.
- Петров В.Г. Наледи на Амурско-Якутской магистрали. Л.: Изд-во АН СССР, 1930. 177 с.
- Природные опасности России. Геокриологические опасности / Л.С. Гарагуля, С.Н. Булдович, В.Е. Романовский и др. Москва: фирма «КРУК», 2000. 315 с.
- Стругов А.С. Взрыв гидролакколита (Читинская область) // Природа. 1955. № 6. С. 117.
- Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. Преобразование многолетнемерзлых пород при диссоциации газогидратов // Материалы международной конференции по мерзлотоведению «Earth's Cryosphere: Past, Present and Future», Пущино. 2017. С. 131–132.
- Эпов М.И., Ельцов И.Н., Оленченко В.В., Потапов В.В., Кушнаренко О.Н., Плотников А.Е., Синицкий А.И. Бермудский треугольник Ямала // Наука из первых рук. 2014. Т. 59, № 5. С. 14–23.
- Leibman M.O., Kizyakov A.I., Plekhanov A.V., Streletskaya I.D. New permafrost feature – deep crater in central Yamal (West Siberia, Russia) as a response to local climate fluctuations // Geography environment. 2014. V. 7, № 4. P. 68–80.

DOI: 10.15356/2071-9388\_04v07\_2014\_05

- *Mackay J.R.* Pingos of the Tuktoyaktuk Peninsula Area, Northwest Territories // Geogr. Phis. Quart. 1979. V. 33, № 1. P. 3–61. DOI: 10.7202/ 1000322ar
- *Mackay J. R.* Pingo Growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula Area, Western Arctic Coast, Canada: a long-term field study // Géographie physique et Quaternaire. 1998. Vol. 52, No. 3. P. 271–323. DOI: 10.7202/004847ar
- Savatorova V.L., Talonov A.V., Vlasov A.N., Volkov-Bogorodskiy D.B. Brinkman's filtration of fluid in rigid porous media: multiscale analysis and investigation of effective permeability // Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal. 2015. Vol. 6, No. 3.

P. 239–264. DOI: 10.1615/CompMechComput AppIIntJ.v6.i3.50

- Savatorova V.L., Talonov A.V., Vlasov A.N., Volkov-Bogorodsky D.B. Multiscale modeling of gas flow through organic-rich shale matrix // Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal. 2016. Vol. 7, No. 1. P. 45–70. DOI: 10.1615/ CompMechComputAppIIntJ.v7.i1.40
- Vlasov A.N., Savatorova V.L., Talonov A.V. The use of the multiscale averaging method for describing mass transfer processes in organic materials of geomaterials, *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy* (Mechanics of Composite Materials and Structures), 2016, Vol. 22, No. 3, pp. 362–377.

# Сведения об авторах

**ВЛАСОВ Александр Николаевич** — доктор технических наук, директор, Институт прикладной механики Российской академии наук (ИПРИМ РАН). 125040, Россия, Москва, Ленинградский проспект д. 7, стр. 1. E-mail: iam@iam.ras.ru

**ХИМЕНКОВ Александр Николаевич** — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН). 101000, Москва, Уланский переулок, д. 13, стр. 2, а/я 145. Е-mail: a\_khimenkov@mail.ru (автор для переписки)

**ВОЛКОВ-БОГОРОДСКИЙ Дмитрий Борисович** — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт прикладной механики Российской академии наук (ИПРИМ РАН). 125040, Москва, Ленинградский проспект д. 7, стр. 1. E-mail: v-b1957@yandex.ru

**ЛЕВИН Юрий Константинович** — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Институт прикладной механики Российской академии наук (ИПРИМ РАН). 125040, Москва, Ленинградский проспект д. 7, стр. 1. E-mail: iam-ras@mail.ru

# **METADATA IN ENGLISH**

# About the journal

NAUKA I TEKHNOLOGICHESKIE RAZRABOTKI (SCIENCE AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS), ISSN: 2079-5165, eISSN: 2410-7948, DOI: 10.21455/std; https://elibrary.ru/title\_about.asp?id=32295; http://std.ifz.ru/. The journal was founded in 1992.

# NATURAL EXPLOSIVE PROCESSES IN THE PERMAFROST AREA

© 2017 A.N. Vlasov<sup>1</sup>, A.N. Khimenkov<sup>2</sup>, D.B. Volkov-Bogorodskiy<sup>1</sup>, Yu.K. Levin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

НАУКА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ, 2017, том 96, № 3, с. 41–56 Corresponding author: A.N. Khimenkov, e-mail: a\_khimenkov@mail.ru

#### Highlights

- Two types of natural explosive processes in the permafrost are described
- Explosions of blisters and icing mound are caused by water freezing in closed volumes
- The second type is release of gases during dissociation of gas hydrates in permafrost
- Stages of the natural explosive processes are considered
- Features of gas hydrate dissociation before impended explosions are shown

Abstract. The aim of the paper is the consideration of the group's natural explosive processes on the area of permafrost, which have not been allocated. The first group described the long and associated with freezing of water in closed environments (explosions of blisters and icing mound). The second was allocated in the last 3 years. It is associated with the release of underground gases formed during dissociation of gas hydrate contained in permafrost. The cause of the explosion in both cases is formation overpressure in the soil mass containing free water or gas. Once pressure exceeds the strength of the roof of permafrost occurs her release. It can identify a number of common features of preparation of the explosive processes in the permafrost. First, there is a local zone where is concentrated substance forming explosion: over-freezing streambed ground water flow, water concentration zone in over-freezing soil mass, gas hydrates in frozen soil. Second, there is the pressure of a compressive the substance. Third, there are deformations in overlying soils. If pressure increases slowly and the roof have time to deform, then there is plastic deformation. In this case mounds are formed. It is expressed in the topography. If the pressure increases quickly then plastic deformation may not occur. Fourth, it is the explosion itself. As many authors described the explosion effect on the objects of various origins has common characteristics. It is a gas-saturated water and gas ejection, also ground and ice debris, which are launched on ten and sometimes on hundred meters. During dissociation of the gas hydrate in frozen ground first micro-cracks are arising. Then they make up ascended subvertical channels and elongate pores growing under sufficiently high pressure. Gas hydrat cropout on the soil surface and gas evaporation is prevented by the durable monolithic overlying ice-soil "cover". As a result of this impossibility the crack-pore structure of the frozen ground is formed under "cover". Then the width of crack opening and the pore size are increased with pressure grow by gas filtration from the source. They merge together founded cavity in which continue gas leakage. In the moment of exceeding the ultimate strength limit, the "cover" could not bear stresses and accumulated potential gas energy is released (i.e. transformed to the kinetic one) by the explosion. During Arctic development the hazard of explosion processes for engineering constructions will be increased. Nevertheless this group of risk is not only not considering under designing and prediction, but even not including in the group of danger geological processes.

Keywords: permafrost, gas hydrates, blister, explosion, crater, stages, dissociation.

**Cite this article as:** *Vlasov A.N., Khimenkov A.N., Volkov-Bogorodskiy D.B., Levin Yu.K.* Natural explosive processes in the permafrost area, *Nauka i Tekhnologicheskie Razrabotki* (Science and Technological Developments). 2017. Vol. 96, No. 3. P. 41–56. [Special issue "Applied Geophysics: New Developments and Results. Part. 1. Seismology and Seismic Exploration"]. [in Russian]. DOI: 10.21455/std2017.3-4

#### References

- *Andreev V.I.* Hydrolakkolites (Bulgunnyakhs) in the West Siberian Tundra, *Izvestiya Gosudarstvennogo geograficheskogo obshchestva* (Izvestia of the State Geographical Society), 1936, Vol. 68, No. 2, pp. 186–210.
- Bazhenova O.I. Modern dynamics of lake-fluvial systems of the Onon-Torean high plain (Southern

Transbaikalia), *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* (Bulletin of Tomsk State University), 2013, No. 371, pp. 171–177.

Bogomolov N.S., Sklyarevskaya A.N. On the explosions of hydrolakkolites in the southern part of the Chita region, Naledi Sibiri, Moscow, Nauka, 1969, pp. 127–130.

- *Bogoyavlenskiy V.I.* Oil and gas emissions on land and offshore areas of the Arctic and the World Ocean, *Bureniye i neft*' (Drilling and Oil), 2015, No. 6, pp.4–10.
- *Bogoyavlenskiy V.I., Garagash I.A.* Mathematical modeling of the formation process of craters of gas ejection in the Arctic, *Arktika. Ekologiya i ekonomika* (Arctic. Ecology and Economics), 2015, No. 3. pp. 12–17.
- GOST R 22.0.08-96. Safety in Emergency Situations. Man-Caused Emergency Situations. Explosions. Terms and Definitions. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 1996.
- *Griva G.I.* Geoecological Conditions for the Development of Gas Fields in the Yamal Peninsula: author's abstract. Diss. ... Dr. Geol.-Min. Sciences. Nadym, 2006. 41 p.
- *Devisilov V.A., Drozdova T.I., Timofeeva S.S.* Theory of Combustion and Explosion. Workshop: A Training Manual. Moscow: FORUM, 2012, 352 p.
- Dyadin Yu.A., Gushchin A.L. Gas hydrates, Sorosovskiy Obrazovatel'nyy zhurnal (Soros Educational Magazine). 1998, Issue. 3, pp. 55–64.
- Epov M.I., Eltsov I.N., Olenchenko V.V., Potapov V.V., Kushnarenko O.N., Plotnikov A.E., Sinitsky A.I.
  Bermuda Triangle of Yamal, Nauka iz pervykh ruk (Science from the First-Hand), 2014. Vol. 59, No. 5. pp. 14–23.
- Khimenkov A.N., Sergeev D.O., Stanilovskaya Yu.V., Vlasov A.N., Volkov-Bogorodskiy D.B. Transformation of permafrost during the dissociation of gas hydrates, Proceedings of the International Conference on Permafrost "Earth's Cryosphere: Past, Present and Future", Pushchino, 2017. pp. 131–132.
- Kizyakov A.I., Sonyushkin A.V., Leibman M.O., Zimin M.V., Khomutov A.V. Geomorphological conditions for the formation of a gas discharge funnel and the dynamics of this shape in central Yamal // Kriosfera Zemli, (Cryosphere of the Earth), 2015, Vol. XIX, No. 2, pp. 15–25.
- Leibman M.O., Kizyakov A.I., Plekhanov A.V., Streletskaya I.D. New permafrost feature – deep crater in central Yamal (West Siberia, Russia) as a

response to local climate fluctuations, *Geography Environment*, 2014, Vol. 7, No. 4, pp. 68–80. DOI: 10.15356/2071-9388\_04v07\_2014\_05

- *Mackay J.R.* Pingos of the Tuktoyaktuk Peninsula Area, Northwest Territories, *Géographie Physique et Quaternaire*, 1979, Vol. 33, No. 1. pp. 3–61. DOI : 10.7202/1000322ar
- *Mackay J. R.* Pingo Growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula Area, Western Arctic Coast, Canada: a long-term field study, *Géographie Physique et Quaternaire*, Volume, 1998, Vol. 52, No. 3, pp. 271–323. DOI 10.7202/004847ar
- Natural Hazards of Russia. Geocryological Hazards / Garagulya L.S., Buldovich S.N., Romanovsky V.E. et al. Moscow: KRUK, 2000, 315 p.
- *Petrov V.G.* Naledi on the Amur-Yakutian Highway, Leningrad, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1930, 177 p.
- Strugov A.S. The explosion of the hydro-laccolith (Chita Region), *Priroda* (Nature), 1955, No. 6, p. 117.
- Savatorova V.L., Talonov A.V., Vlasov A.N., Volkov-Bogorodskiy D.B. Brinkman's filtration of fluid in rigid porous media: multiscale analysis and investigation of effective permeability, Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal, 2015. Vol. 6, No. 3. P. 239– 264. DOI: 10.1615/CompMechComputApplIntJ. v6.i3.50
- Savatorova V.L., Talonov A.V., Vlasov A.N., Volkov-Bogorodskiy D.B. Multiscale modeling of gas flow through organic-rich shale matrix, Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal, 2016, Vol. 7, No. 1, pp. 45– 70. DOI: 10.1615/CompMechComputApplIntJ. v7.i1.40
- Vlasov A.N., Savatorova V.L., Talonov A.V. The use of the multiscale averaging method for describing mass transfer processes in organic materials of geomaterials, *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy* (Mechanics of Composite Materials and Structures), 2016, Vol. 22, No. 3, pp. 362–377.

#### About the authors

**VLASOV Alexander Nikolaevich** — Doctor of Technical Sciences, Director, Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPRIM RAS). 125040, Russia, Moscow, Leningradskii prospekt 7, stroenie 1. E-mail: iam@iam.ras.ru



**KHIMENKOV Alexander Nikolaevich** — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Sergeeva Institute of Geoecology of the Russian Academy of Sciences (IGE RAS). 101000, Moscow, Ulansky pereulok 13, stroenie 2, PO Box 145. E-mail: a\_khimenkov@mail.ru ((corresponding author).

**VOLKOV-BOGORODSKIY Dmitry Borisovich** — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPRIM RAS). 125040, Moscow, Leningradskii prospekt 7, stroenie 1. E-mail:v-b1957@yandex.ru.

**LEVIN Yuri Konstantinovich** — Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory, Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPRIM RAS). 125040, Moscow, Leningradskii prospekt 7, stroenie 1. E-mail: iam-ras@mail.ru.