Теоретическое обоснование гипотезы о природе образования жерла цилиндрической формы криогенного вулкана в криолитозоне Арктики

Илья Иосифович ЖЕЛЕЗНЯК
Павел Юрьевич ЛУКЬЯНОВ*

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

Аннотация

Актуальность работы. Криовулканические явления в криолитозоне Земли находятся на самой начальной стадии изучения.

Цель настоящей статьи состоит в формировании и изучении теоретических представлений о природе и механизме образования жерла цилиндрической формы для получения научно обоснованных знаний, которые в последующем могут быть полезны при выработке методики и содержания натурных исследований, лабораторных экспериментов и прогнозных расчетов. Реализация поставленной цели базируется на основных рабочих гипотезах образования исследуемого криогенного вулкана и вызвавших его криогенных процессах в массиве многолетнемерзлых горных пород: газация (насыщение газом), связанная с существованием пластовых подземных льдов и реакцией вечной мерзлоты на колебания климата; дегазация, сопровождающаяся пневматическим выбросом породы и льда на прилегающую территорию. Обращено внимание и на гипотезу, основывающуюся на представлениях о миграции и аккумуляции углеводородов в многолетнемерзлой толще пород в результате макро- и микропросачивания газов, приводящих к формированию приповерхностных окислительно-восстановительных зон, благоприятных для биodeградации углеводородов с образованием вторичных микробиальных газов, прежде всего, метана.

Методология исследований, предпринятых авторами, предусматривает выполнение сравнительного анализа характеристик состава и свойств однородных элементов изучаемого объекта, выявленных в результате первичных замеров и визуальных обследований и представленных теоретических гипотезах.

Результаты работы и область их применения позволили выявить теоретические предпосылки для обоснования гипотезы о сложной природе образования жерла криогенного вулкана цилиндрической формы, выражающейся сочетанием длительных механических и термобioхимических процессов в многолетнемерзлых породах.

Выводы. Авторами выдвинута гипотеза о существенном вкладе биохимических процессов с участием углеводородов, в том числе и в жидкой фазе, в формирование первичной полости (жерла) правильной цилиндрической формы в массиве горных пород на этапах, предшествующих взрывообразному выбросу пород кратера. В качестве взаимосвязанной с ней авторами теоретически обоснована гипотеза образования меромиктического водоема с установившейся неперемешиваемой стратифицированной анаэробной глубинной частью в жерле криовулкана после взрывообразного разрушения бугра пучения. Представлено объяснение природы источника возгорания газа (от искры, образующейся при соударении твердых обломков пород в момент криовулканического выброса пород), а также сегнетоэлектрического эффекта, возникающего при деформации мерзлых пород.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, лед, бугор пучения, криовулканизм, жерло, термобioхимические процесс.

Введение

В последние десятилетия на ландшафте арктической тундры на полуостровах Ямал, Гыдан, Таймыр, Таз было обнаружено несколько специфичных объектов поверхностных газопроявлений, природа которых связана с взрывообразными выбросами газа из недр криолитосферы. Эти объекты, называемые исследователями воронками-колодцами (кратерами, провалами), получили названия Бованенковская (п-ов Ямал), Дерябинская, Сеяхская (п-ов Таймыр), Антипаютинская, Еркатаяхская (п-ов Таз).

Результаты начального этапа их исследований представлены в современных научных публикациях [1–6]. Такие газопроявления идентичны по условиям образования, строению и, как правило, совпадают с местами предыдущего расположения бугров пучения. Некоторые из них, например Саяхское, не связаны с буграми пучения, а проявились на дне реки и мгновенно заполнились водой [4].

Обоснованный интерес исследователи проявили к воронке-колодцу осваиваемого Бованенковского

*lgc255@mail.ru

нефтегазоконденсатного месторождения. В результате его натурного изучения получены сведения о геоморфологических [1, 7] и геофизических условиях на территории [2], прилегающей к изучаемому объекту. На этом этапе исследований выдвинуты рабочие гипотезы о природе и механизмах образования изучаемого объекта, обоснованность которых пока нельзя охарактеризовать достаточно убедительной. В то же время не вызывает сомнения актуальность обсуждения выдвинутых и новых гипотез. Это послужит не только расширению и углублению теоретических представлений об уникальном природном явлении, но и наиболее рациональному и эффективному планированию и выполнению натурных, лабораторных и теоретических исследований с целью получения реальных показателей свойств и процессов, лежащих в основе природы криовулканизма, который может иметь место и на других планетах Солнечной системы [8].

В представленной статье рассматриваются только те процессы, в результате которых могла сформироваться первичная полость правильной цилиндрической формы, ставшая в результате последовавшего взрыва жерлом криовулкана, а также вероятные условия в первичной полости, обусловившие характер и энергетику взрывообразного выброса из недр криолитосферы пластового льда и многолетнемерзлых пород.

Основные гипотетические представления о природе исследуемого объекта

По результатам первичного обследования, геоморфологических и геофизических исследований был выделен ряд рабочих гипотез, из которых особый интерес, на наш взгляд, представляют следующие.

Гипотеза Leibman, Кизякова и др. [1, 7] основывается на представлении о природе образования воронки, связанной с газацией (насыщением газом) пород и льда, слагающих бугор пучения, за счет вмещающего его массива многолетнемерзлых пород. Гипотеза сформулирована в общем виде следующим образом: «Газация связана с существованием пластовых подземных льдов и реакцией вечной мерзлоты на колебания климата. Наиболее непротиворечивые механизмы, объясняющие явление, – это повышение температуры пород в течение последнего десятилетия. Особую роль в образовании воронки сыграли не столько тренд повышения температуры, сколько экстремы 2012 года. Логично предположить, что они могут повторяться на других участках криолитозоны».

Гипотеза Богоявленского и др. [4] состоит в том, что механизм образования кратера объясняется частичным оттаиванием нижней части подземного ледяного ядра и заполнением освободившегося за счет этого подземного объема газа. Рост давления в этом объеме газа приводит в конечном итоге к выбросу породы и льда на прилегающую территорию. При этом В. И. Богоявленский обращает внимание на тот факт, что «...подобное природное явление известно мировому научному сообществу уже около 50 лет и не является открытием».

Гипотеза В. А. Епифанова [5] предполагает, что образование, в частности Дерябинской воронки, связано с современным притоком глубинных флюидов и локализованной конденсацией углеводородов в подошве горизонта многолетнемерзлых пород. При этом цилиндрическая

форма жерла объясняется напорно-вихревым механизмом выброса газа из недр.

Гипотеза Курчатовой и др. [9] основывается на представлениях о миграции и аккумуляции углеводородов в многолетнемерзлой толще пород в результате макро- и микропросачивания газов. Это приводит к формированию приповерхностных окислительно-восстановительных зон, которые благоприятны для биодеградаций углеводородов с образованием вторичных микробиальных газов, прежде всего, метана, с более легким изотопным составом.

Гипотеза Оленченко и др. [2] ориентируется на пневматический механизм образования объекта под действием залегающего под ним на глубине 60–80 м от поверхности земли насыщенного газогидратами горизонта, выявленного по геофизическим признакам. Движение газа из насыщенного газогидратами горизонта к поверхности земли, наиболее вероятно, осуществляется по трещинам, приуроченным к разломам во вмещающем массиве горных пород.

Гипотеза Buldovicz и др. [10] основывается на представлениях о происхождении изучаемого объекта вследствие криосферных процессов: «...В результате коллапса большого бугра пучения (пинго), образовавшегося в озерном оттепе, когда он заштукатурен и высох, позволяя большому талику (то есть слою или телу незамерзшей земли в зоне вечной мерзлоты) под ним вновь замерзнуть. Бугор пучения разрушился под криогенным гидростатическим давлением замерзающего талика, расположенного в замкнутой системе. Это событие произошло до завершения замораживания, когда ядро влажной почвы оставалось размороженным и хранило огромное количество двуокиси углерода, растворенной в поровой воде. В результате насыщения газовой фазы влажного ядра возникшее в нем избыточное давление превысило прочность вышележащего льда и разрушило его. По мере «взрыва» бугра пучения демаркация кратера следовала за цилиндрической формой остаточного ядра талика». Представленная гипотеза криогенеза исследуемого природного явления послужила основанием для введения такого понятия, как «криовулканизм».

Анализ сведений, обосновывающих приведенные рабочие гипотезы, показывает, что достоверно не установлены природа, источники и механизмы исследуемого явления, а также качественные параметры, количественные показатели силового и энергетического характера, обеспечившие его реализацию. Кроме того, исследователи используют произвольные, взаимно не согласующиеся названия структурных элементов изучаемого природного объекта.

Поэтому прежде чем приступить к анализу процессов, целесообразно определиться с общностью терминологических названий и понятий изучаемого объекта. Для этого сформулируем в общем виде понятие об объекте исследований, соответствующее полученным знаниям, представлениям и результатам настоящего этапа его изучения. В качестве аналога воспользуемся терминами определения известного понятия «вулканизм». По нашему мнению, «криовулканизм» – это взрывообразный выброс подземным природным газом из недр криолитосферы Земли на

ее поверхность обломков многолетнемерзлых дисперсных горных пород, льда и воды. Нередко вследствие этого явления формируется водоем. В результате криовулканического явления образуются специфичные структурные элементы правильной геометрической формы: жерло цилиндрической формы, кратер в виде усеченного конуса, обрамляющий навал выброшенной породы за борт кратера, как правило, повторяющий геометрическое очертание кратера в виде окружности, а также разброс обломков выброшенной породы и льда. Такой тип криовулканизма приурочен, как правило, к многолетним буграм пучения (пинго), распространенным на арктической территории криолитозоны Земли [11, 12]. Известны и другие типы газопоявлений, не связанные с природой образования и развития бугров пучения [4, 5].

Рассмотрим выдвинутые гипотезы с целью выяснения причинно-следственных связей образования жерла цилиндрической формы на примере криогенного вулкана «Бованенково».

Обсуждение результатов изучения криогенного вулкана «Бованенково»

С целью определения подходов к обоснованию объективности и достоверности объяснения природы источников и механизмов криовулканического явления, установления его качественных параметров, количественных показателей рассмотрим исследуемый объект, образовавшийся на месте бугра пучения высотой около 6 м в результате выброса из верхнего горизонта льда и дисперсной горной породы одним из известных механизмов, обосновывающим представленные гипотезы исследователей.

Объект состоит из жерла с установленной глубиной около 50 м, диаметром 16 м, кратера формы перевернутого усеченного конуса высотой около 8 м с нижним диаметром 16 м и верхним 30 м [1, 7]. Кратер обрамлен навалом в форме окружности высотой около 4 м, наружный диаметр основания навала составляет около 60 м.

Анализ данных натурных исследований вызывает ряд вопросов. Достоверные и полные экспериментально обоснованные ответы на них пока не представлены специалистам на дискуссионное обсуждение. Одним из ключевых из них является вопрос о природе и механизме образования жерла правильной цилиндрической формы.

В частности, исследователи сообщают [1, 7], что по состоянию на 16 июля 2014 г. уровень воды в жерле находился на глубине 50 м, а к 25 августа он поднялся на 15 м выше. Таким образом, за 40 сут объем воды увеличился на 3014 м³. Согласно этим данным, возникает вопрос: за счет каких процессов и явлений в толще многолетнемерзлых пород сформировалась полость цилиндрической формы глубиной более 50 м и диаметром 16 м? Изучение геометрического очертания и строения большого количества известных «провалов» естественной природы в верхних горизонтах литосферы в различных регионах Земли вне криолитозоны показывает, что в результате карстовой природы они имеют форму цилиндра и на поверхности земли представлены окружностью [13]. В связи с этим нельзя исключить карстовую природу образования полости цилиндрической формы, сыгравшей впоследствии роль жерла криогенного вулкана. Возможность карстовой природы образования жерла может объясняться

засоленностью пород, связанной с предшествовавшими глобальными историческими изменениями акватории Северного Ледовитого океана, на что указывает [14]. Требуют ответа вопросы о том, какая среда много лет служила основанием бугра пучения, как и на какой глубине она образовалась.

Определение исследователями повышенного содержания газа органолептическим методом не дает ответа на вопрос, какой газ выходил из кратера в июле 2014 г. Дело в том, что такие газы, как метан, этан, бутан, пропан и другие в природных условиях не обладают запахом. При смешивании с другими газами они идентифицируются органолептическим методом по признакам газа-примеси, имеющего запах в зависимости от природы его образования.

Теоретическое обоснование термобioхимической гипотезы образования цилиндрической формы жерла криогенного вулкана

Наша гипотеза ориентирована на биокарстовую природу жерла, основывающуюся на сочетании механических и термобioхимических процессов, происходивших длительное время в многолетнемерзлых породах. Она исходит из того, что жерло имеет правильную цилиндрическую форму и ровную гладкую поверхность. Такая поверхность образуется, как правило, в результате термических (оттаивание), химических (выщелачивание) или биохимических процессов, связанных с возможностью роста микробиологической и биогеохимической активности микроорганизмов при высоких концентрациях хлорида натрия в мерзлых породах и их влиянием на криобioлогический ресурсный потенциал верхних горизонтов криолитозоны [15]. С этим согласуются и результаты ранее выполненных исследований [16, 17].

При этом нельзя исключать формирование поверхности жерла сочетанием механических процессов (размывание) с растворением. Вероятно, что образование криовулкана происходило как минимум в два этапа. На первом этапе в результате многолетних термобioхимических процессов образовалось жерло под перекрытием из замерзшего льда и породы, слагающих бугор пучения. Взрывообразный характер выброса многолетнемерзлых породы и льда, перекрывавших жерло на заключительном этапе формирования кратера, не вызывает особых сомнений.

Следует обратить особое внимание на факт залегания в толще многолетнемерзлых пород на глубине 60–80 м под жерлом пластов, насыщенных природными углеводородами [2]. В случае проникновения углеводородов из этих пластов, например по трещинам в горных породах, в первичной полости могли сформироваться анаэробные условия при избыточном давлении газов до 0,4–0,8 МПа. Такая оценка избыточного давления может быть получена из условия равновесия толщи мерзлого грунта, перекрывающего первичную полость (около 8 м) и слагающего бугор пучения, наблюдавшийся на месте образования воронки до взрыва (до 6 м). Как известно, уже при давлении в 0,4 МПа и температуре около 0 °С такие фракции природного газа, как пентан, бутан и метилпропан, переходят в жидкую фазу (газовый конденсат) [18, 19]. При возрастании избыточного давления до верхней оценки в жидкое состояние переходит также и пропан. Это дает основание

Рисунок 1. Структура первичной полости перед взрывом с образованием «воронки»: 1 – супесь; 2 – суглинок; 3 – коллектор газогидратов; 4 – газообразные углеводороды (метан, этан, пропан) под давлением до 0,4–0,8 МПа; 5 – вода в жидкой фазе с кристаллогидратами газов; 6 – углеводороды в жидкой фазе; 7 – трещиноватая часть массива.

Figure 1. The structure of the primary cavity before the explosion with the formation of a “funnel”. 1 – sandy loam; 2 – loam; 3 – collector of gas hydrates; 4 – gaseous hydrocarbons (methane, ethane, propane) under pressure up to 0.4–0.8 MPa; 5 – water in liquid phase with crystalline gas hydrates; 6 – hydrocarbons in the liquid phase; 7 – fractured part of the massif.

сделать предположение о возможности скопления в первичной полости газового конденсата под давлением до 0,8 МПа, представленного всеми компонентами, за исключением метана и этана. Кроме этого, наличие в первичной полости воды под давлением до 0,8 МПа создает условия для образования газовых кристаллогидратов, например с участием сероводорода, тиолов и других подобных соединений [18].

Ряд косвенных признаков (повышенное содержание в воде, заполняющей жерло, гидрокарбонатов, характерный запах сероводорода, а также общая соленость, значительно меньшая критического значения в 24 ‰) дают основания предположить, что до взрывообразного разрушения бугра пучения в жерле под давлением до 0,8 МПа и при наличии воды, газового конденсата и кристаллогидратов газов мог установиться анаэробный стабильный стратифицированный режим со специфическими биохимическими реакциями окисления углеводов за счет участия анаэробной биоты с выделением теплоты, что приводило к постепенному оттаиванию пород на внутренней поверхности первичной полости и ее увеличению в диаметре.

В связи с этим при наличии углеводородов в газовой и жидкой фазах сформировалась возможность для активизации процессов бактериальной сульфатредукции, в результате которых в качестве промежуточных продуктов могут образовываться органические кислоты, в частности уксусная кислота и жирные кислоты [20–22].

Определенный вклад в увеличение размеров первичной полости, кроме выделения тепла в результате этого процесса, могла внести химическая реакция органических кислот с содержащимися в составе породы карбонатами (кальцит, доломит и т. п.) с образованием углекислого газа и растворимых солей. Признаками протекания процессов бактериальной сульфатредукции служат повышенное содержание в воде, заполняющей жерло, гидрокарбонат-аниона и хорошо различимый запах сероводорода, которые также являются продуктами данных процессов с участием органических остатков [2].

Незначительное увеличение диаметра нижней части жерла может объясняться плавным изменением с высотой некоторого параметра (температуры, концентрации сульфат-аниона), влияющего на скорость процессов, в результате которых происходило увеличение полости.

Особый интерес представляют данные геофизических исследований об аномально высокой концентрации нитрат- и нитрит-анионов в воде в кратере [2]. В анаэробных условиях, а также при наличии углеводов и углеводов, нитрат-анион (несколько в меньшей степени – нитрит-анион) представляет собой энергетически эффективный источник кислорода. Реакции бактериальной денитрификации могли сопровождаться разложением нитрат- и нитрит-анионов с выделением газообразных азота и углекислого газа с выделением теплоты. Однако для данной реакции, как известно, требуется поступление извне нитратов. Их аномально высокое содержание в воде, заполняющей жерло [2], может быть объяснено как вымыванием из породы или другими геологическими процессами, так и биогенным синтезом в результате аэробных процессов в уже образованном кратере после разрушения с выбросом грунта и льда, слагающего бугор пучения. Определенный вклад в формирование первичной полости жерла, в том числе и как источник тепла мог обеспечить и данный вид процессов. Однако процессы денитрификации в анаэробных условиях при формировании жерла должны были бы привести к существенному уменьшению концентрации нитрат- и нитрит-анионов. В связи с этим можно выразить предположение о том, что аномально высокая концентрация нитрат- и нитрит-анионов сформировалась уже после взрыва криовулкана, что скорее указывает на геологические причины их происхождения.

В соответствии с нашей гипотезой с большой степенью вероятности можно предполагать, что водоем, образовавшийся в жерле после взрывообразного разрушения бугра пучения, является меромиктическим, т. е. имеет перемешиваемую стратифицированную анаэробную глубинную зону [23–27], причем вертикально-стратифицированный режим в нижней части первичной полости установился еще до завершения формирования жерла (рис. 1) [28].

Таким образом, одной из наиболее близких к реальной можно считать следующую версию о природе образования криогенного вулкана. В результате разломообразования и криогенного растрескивания сформировался трещиноватый газопроницаемый массив многолетнемерзлых горных пород, в который поступали газы из расположенных ниже углеводородсодержащих пластов.

В полостях наиболее трещиноватой части массива многолетнемерзлых горных пород активизируются

биохимические процессы с участием углеводов, сопровождающиеся выделением теплоты, повышением температуры, образованием органических кислот и других продуктов анаэробного окисления. В результате оттаивания грунта и выщелачивания под действием органических кислот узкие трещины расширяются, сливаясь в одну. Поскольку биохимические процессы происходят преимущественно на поверхности пород, слагающих жерло, с небольшой, но постоянной скоростью, это приводит к формированию полости относительно правильной (цилиндрической) формы.

После формирования полости или в ходе этого процесса давление в ней повышается, что приводит к постепенной конденсации части углеводов, начиная с наиболее тяжелых фракций. В полости формируется вертикально стратифицированный водоем с образованием отложений кристаллогидратов углеводов, сероводорода и тиолов на дне и слоем жидких углеводов поверх его собственно водной части. Независимо от этого за счет выдавливания избыточным давлением газов пород, слагающих «перекрытие» первичной полости, в верхней части массива формируется бугор пучения.

В заключение следует отметить, что в какой-то момент в результате взрывного разрушения бугра пучения на завершающем этапе формирования кратера возникают условия для возгорания выброшенных из жерла и интенсивно кипящих вследствие понижения давления жидких углеводов. Причем возгорание газов может произойти также за счет поляризационных эффектов при наличии в породе кристаллов недавно обнаруженного в природных объектах льда «0», обладающего сегнетоэлектрическими свойствами [29, 30]. Также вследствие снижения давления после взрыва должны были происходить распад кристаллогидратов горючих газов (в том

числе сероводорода и тиолов) и смешивание продуктов распада с атмосферным кислородом. Ученые констатируют, что обнаруженные ими обуглившиеся песок и растительность на навале вокруг кратера, образовавшиеся в результате газового выброса, свидетельствуют о воспламенении газа, выброшенного из недр [10]. Аналогичную версию теоретически подтверждает А. Н. Курчатова, которая допускает возможность слабого подземного взрыва газа на небольшой глубине при смещении пластовых льдов, вызвавшего разрушение бугра пучения с выбросом пород и льда.

По нашему мнению, наличие следов обугливания, обнаруженных на обломках горных пород, найденных в радиусе выброса, можно объяснить тем, что в качестве источника возгорания закономерно рассматривать искры, возникающие при соударении твердых обломков пород, а также электрические (сегнетоэлектрические) эффекты при деформации мерзлых пород. В частности, именно возгоранием горючих газов, образовавшихся вследствие кипения газового конденсата и распада кристаллогидратов после разрушения «перекрытия» первичной полости, может объясняться слой сажи, наблюдавшийся при обследовании кратера.

Выводы

1. Выдвинута и теоретически обоснована гипотеза о сложной природе образования жерла криогенного вулкана цилиндрической формы, основанная на сочетании длительных механических и термобихимических процессов в многолетнемерзлых породах.

2. Выдвинута и теоретически обоснована гипотеза образования меромиктического водоема с установившейся неперемешиваемой стратифицированной анаэробной глубинной частью в жерле криовулкана после взрывообразного разрушения бугра пучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Leibman M. O., Kizyakov A. I., Plekhanov A. V., Streletskaia I. D. New permafrost feature – deep crater in central Yamal (West Siberia, Russia) as a response to local climate fluctuations // *Geography, Environment, Sustainability*. 2014. Vol. 7, issue 4. P. 68–79. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2014-7-4-68-79>
2. Оленченко В. В., Сеницкий А. И., Антонов Е. Ю., Ельцов И. Н., Кушнаренко О. Н., Плотников А. Е., Потапов В. В., Эпов М. И. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования «Ямальский кратер» // *Криосфера Земли*. 2015. Т. 19, № 4. С. 94–106.
3. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // *Бурение и нефть* 2014. № 9. С. 13–18.
4. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Мажаров А. В., Богоявленский И. В., Никонов Р. А., Кишанков А. В., Каргина Т. Н. Дегазация земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 1 (33). С. 88–105. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-1-88-105>
5. Епифанов В. А. Взрывные воронки-колодцы и актуальность изучения роли дегазации недр в климатических событиях и ландшафтных преобразованиях четвертичного периода // *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода*. 2018. № 76. С. 5–40.
6. Хименков А. Н., Станиловская Ю. В. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера // *Арктика и Антарктика*. 2018. № 3. С. 1–25. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2018.3.27524>
7. Кизяков А. И., Солюшкин 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. 19, № 2. С. 15–25.
8. Sparks W. B., Schmidt B. E., McGrath M. A., Hand K. P., Spencer J. R., Cracraft M., Deustua S. E. Active Cryovolcanism on Europa? // *Astrophysical Journal Letters*. 2017. Vol. 839, issue 2. L18 (5pp). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa67f8>
9. Курчатова А. В., Порог В. В. Формирование геохимических аномалий при миграции углеводов в криолитозоне западной Сибири // *Лед и Снег*. 2018. Т. 58(2). С. 199–212. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-199-212>
10. Buldovicz S. N., Khilimoniyuk V. Z., Bychkov A. Y., Ospennikov E. N., Vorobyev S. A., Gunar A. Y., Gorshkov E. I., Chuvilin E. M., Cherbunina M. Y., Kotov P. I., Lubnina N. V., Motenko R. G., Amanzhurov R. M. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a Spectacular Crater in the Yamal Peninsula (Russia) // *Scientific reports, Nature Publishing Group (United Kingdom)*. 2018. Vol. 8, issue 1. 13534. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31858-9>
11. Алексеев В. Р. Криовулканизм и загадка Патомского конуса // *Геодинамика и тектонофизика*. 2012. Т. 3, № 3. С. 289–307. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-3-0075>
12. Mackay J. R. Pingo growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula area, western arctic coast, Canada: A long-term field study // *Geographie Physique et Quaternaire*. 1998. Vol. 52, issue 3. P. 271–323. <https://doi.org/10.7202/004847ar>
13. Waltham T. Sinkhole hazard case histories in karst terrains // *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2008. Vol. 41, issue

3. P. 291–300. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/07-211>

14. Доманская О. В., Доманский В. О., Кулакова А. Ю. Исследование микробиологической и биохимической активности мерзлых отложений Западной Сибири // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 5. С. 645–653. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21761>

15. Мельников В. П., Рогов В. В., Курчатова А. Н., Брушков А. В., Грива Г. И. Распределение микроорганизмов в мерзлых грунтах // Криосфера Земли. 2011. Т. 15, № 4. С. 86–90.

16. Кузнецов Ф. А., Истомин В. А., Родионова Т. В. Газовые гидраты: исторический экскурс, современное состояние, перспективы исследований // Российский химический журнал. 2003. Т. XLVII, № 3. С. 3–18.

17. Справочник химика / под ред. Б. П. Никольского. 3-е изд., испр. М.; Л.: Химия, 1971. Т. 2. 1168 с.

18. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.

19. Толпешта И. И., Трофимов С. Я., Эркенова М. И., Соколова Т. А., Степанов А. Л., Лысак Л. В., Лобаненков А. М. Лабораторное моделирование последовательного аэробного и анаэробного разложения нефтепродуктов в загрязненном нефтью верховом торфе // Почвоведение. 2015. № 3. С. 360–372. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15030120>

20. Zehnder A. J. B., Brock T. D. Anaerobic Methane Oxidation: Occurrence and Ecology // Applied and Environmental Microbiology. 1980. Vol. 9, issue 1. P. 194–204.

21. Atlas R. M. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: An environmental perspective // Microbiological Reviews. 1981. Vol. 45(1). P. 180–209. <https://doi.org/10.4061/2011/941810>

22. Heider J., Spormann A. M., Beller H. R., Friedrich Widdel. Anaerobic bacterial metabolism of hydrocarbons // FEMS Microbiology Reviews. 1998. Vol. 22, issue 5. P. 459–473. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.1998.tb00381.x>

23. Boehrer B., Schultze M. Stratification of lakes // Reviews of Geophysics. 2008. Vol. 46, issue 2. RG2005. <https://doi.org/10.1029/2006RG000210>

24. Лукьянов П. Ю., Крылов С. Д., Орлов А. О., Цыренжапов С. В., Харин Ю. В., Щерина К. А. Тепломассообмен в меромиктическом содовом озере Доронинском // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 1. С. 30–41. <https://doi.org/10.7868/S0321059618010121>

25. Пименов Н. В., Каллистова А. Ю., Русанов И. И., Юсупов С. К., Монтонен Л., Юргенс Г., Мюнстер У., Ножевникова А. Н., Иванов М. В. Образование и окисление метана в меромиктическом озере Гёк-Гёль (Азербайджан) // Микробиология. 2010. Т. 79, № 2. С. 270–276. <https://doi.org/10.1134/S0026261710020177>

26. Каллистова А. Ю., Меркель А. Ю., Тарновецкий И. Ю., Пименов Н. В. Образование и окисление метана прокариотами // Микробиология. 2017. Т. 86, № 6. С. 661–683. <https://doi.org/10.7868/S002636561706009X>

27. Matyugina E. B., Belkova N., Borzenko S. V., Lukyanov P. Y., Kabilov M., Baturina O., Martynova-Van Kley A., Nalian A., Ptitsyn A. B. Structure and diversity dynamics of microbial communities at day and night: investigation of meromictic Lake Doroninskoe, Transbaikalia, Russia // Journal of Oceanology and Limnology. 2018. Vol. 36, issue 6. P. 1978–1992. <https://doi.org/10.1007/s00343-018-7332-1>

28. Эпов М. И., Ельцов И. Н., Оленченко В. В., Потапов В. В., Кушнаренко О. Н., Плотников А. Е., Сеницкий А. И. Бермудский треугольник Ямала // Наука из первых рук. 2014. Т. 59, № 5. С. 14–23.

29. Бордонский Г.С., Крылов С.Д., Гурулев А.А. Лёд 0 в природной среде. Экспериментальные данные и предполагаемые области его существования // Лёд и снег. 2020. Т. 60. № 2. С. 263-273. <https://doi.org/10.31857/S2076673420020039>

30. Quigley D., Alfè D., Slater B. Communication: On the stability of ice 0, ice i , and I_h // Journal of Chemical Physics. 2014. Vol. 141, issue 16. 161102. <https://doi.org/10.1063/1.4900772>

Статья поступила в редакцию 23 сентября 2020 года

Theoretical substantiation of the hypothesis on the nature of the formation of a cylindrical eruptive vent of a cryogenic volcano in the cryolithic zone of the Arctic

Ilya Iosiphovich ZHELEZNYAK
Pavel Yur'evich LUK'YANOV

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of RAS, Chita, Russia

Abstract

Relevance of the work. Cryovolcanic phenomena in the permafrost zone of the Earth are at the very initial stage of study.

Purpose of this paper is to form and study theoretical ideas about the nature and mechanism of formation of a cylindrical vent in order to obtain scientifically substantiated knowledge that can subsequently be useful in developing the methodology and content of field studies, laboratory experiments and predictive calculations. The implementation of this goal is based on the main working hypotheses of the formation of the studied cryogenic volcano and the cryogenic processes that caused it in the permafrost massif: gassing (gas saturation) associated with the existence of stratal underground ice and the response of permafrost to climate fluctuations; degassing, accompanied by pneumatic release of rock and ice to the adjacent territory. Attention is also drawn to a hypothesis based on the concept of the migration and accumulation of hydrocarbons in the permafrost strata as a result of macro- and micro-seepage of gases, leading to the formation of near-surface redox zones favorable for the biodegradation of hydrocarbons with the formation of secondary microbial gases, primarily, methane.

Methodology of research provides for a comparative analysis of characteristics of the composition and properties of homogeneous elements of the object under study, identified as a result of primary measurements and visual examinations and presented theoretical hypotheses.

Results of work and scope of their application made it possible to reveal the theoretical prerequisites for substantiating the hypothesis about the complex nature of the formation of a cylindrical vent of a cryogenic volcano, which is expressed by a combination of long-term mechanical and thermobiochemical processes in permafrost.

Conclusions. The authors put forward a hypothesis about the significant contribution of biochemical processes with the participation of hydrocarbons, including in the liquid phase, in the formation of a primary cavity (vent) of a regular cylindrical shape in the rock mass at the stages preceding the explosive outburst of crater rocks. As an interconnected one, the authors theoretically substantiated the hypothesis of the formation of a meromictic reservoir with an established unmixed stratified anaerobic deep part in the cryovolcano vent after the explosive destruction of the heaving mound. An explanation of the nature of the source of gas ignition (from a spark formed during the collision of solid rock fragments at the time of cryovolcanic outburst of rocks), as well as the ferroelectric effect that occurs during deformation of frozen rocks is presented.

Keywords: permafrost, ice, permafrost mound, cryovolcanism, vent, thermobiochemical process.

REFERENCES

1. Leibman M. O., Kizyakov A. I., Plekhanov A. V., Streletskaia I. D. 2014, New permafrost feature – deep crater in central Yamal (West Siberia, Russia) as a response to local climate fluctuations. *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 7(4), pp. 68–80. https://doi.org/10.15356/2071-9388_04v07_2014_05
2. Olenchenko V. V., Sinitsky A. I., Antonov E. Y., Eltsov I. N., Kushnarenko O. N., Plotnikov A. E., Potapov V. V., Epov M. I. 2015, *Rezultaty geofizicheskikh issledovaniy territorii geologicheskogo novoobrazovaniya «Yamal'skiy krater»* [Results of geophysical researches of the area of new geological formation "Yamal crater"]. *Earth's Cryosphere*, vol. 19, issue 4, pp. 94–106. (In Russ.)
3. Bogoyavlenskiy V. I. 2014, *Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. Voronki Yamala i Taymyra* [Risk of catastrophic gas blowouts from the arctic cryolithic zone. Yamal and Taimyr craters]. *Drilling and oil*, vol. 9, pp. 13–18. (In Russ.)
4. Bogoyavlenskiy V. I., Sizov O. S., Mazharov A. V., Bogoyavlenskiy I. V., Nikonov R. A., Kishankov A. V., Kargina T. N. 2019, *Degazatsiya zemli v Arktike: distantsionnyye i ekspeditsionnyye issledovaniya katastroficheskogo Seyakhinskogo vybrosa gaza na poluostrove Yamal* [Earth decontamination in the Arctic: remote and field studies of the Seyakha accident gas emission on the Yamal Peninsula]. *Arktika: ehkologiya i ehkonomika*, vol. 1 (33), pp. 88–105. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-1-88-105> (In Russ.)
5. Epifanov V. A. 2018, *Vzryvnyye voronki-kolodtsy i aktual'nost' izucheniya roli degazatsii nedr v klimaticheskikh sobytiyakh i landshaftnykh preobrazovaniyakh chetvertichnogo perioda* [Explosive funnel-wells and the urgency of studying the role of subsoil degassing in climatic events and landscape transformations of the Quaternary period]. *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*, vol. 76, pp. 5–40. (In Russ.)
6. Khimenkov A. N., Stanilovskaya Yu. V. 2018, *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*, vol. 3, pp. 1–25. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2018.3.27524> (In Russ.)
7. Kizyakov A. I., Sonyushkin A. V., Leibman M. O., Zimin M. V., Khomutov A. V. 2015, *Geomorfologicheskiye usloviya obrazovaniya voronki*

- gazovogo vybrosa i dinamika etoy formy na tsentral'nom Yamale [Geomorphological conditions of the gas-emission crater and its dynamics in Central Yamal]. *Earth's Cryosphere*, vol. 19, issue 2, pp. 15–25. (In Russ.)
8. Sparks W. B., Schmidt B. E., McGrath M. A., Hand K. P., Spencer J. R., Cracraft M., Deustua S. E. 2017, Active Cryovolcanism on Europa? *Astrophysical Journal Letters*, vol. 839, issue 2, L18 (5pp). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa67f8>
 9. Kurchatova A. N., Rogov V. V. 2018, *Formirovaniye geokhimicheskikh anomalii pri migratsii uglevodorodov v kriolitozone zapadnoy Sibiri* [Formation of geochemical anomalies in hydrocarbon migration in the permafrost zone of Western Siberia]. *Led i Sneg*, vol. 58(2), pp. 199–212. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-199-212> (In Russ.)
 10. Buldovicz S. N., Khilimonyuk V. Z., Bychkov A. Y., Ospennikov E. N., Vorobyev S. A., Gunar A. Y., Gorshkov E. I., Chuvin E. M., Cherbunina M. Y., Kotov P. I., Lubnina N. V., Motenko R. G., Amanzhurov R. M. 2018, Cryovolcanism on the Earth: Origin of a Spectacular Crater in the Yamal Peninsula (Russia). *Scientific reports, Nature Publishing Group (United Kingdom)*, vol. 8, issue 1. 13534. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31858-9>
 11. Alekseyev V. R. *Kriovulkanizm i zagadka Patomskogo konusa* [Cryovolcanism and the mystery of the Patom cone]. *Geodynamics & Tectonophysics*, vol. 3, issue 3, pp. 289–307. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-3-0075> (In Russ.)
 12. Mackay J. R. 1998, Pingo growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula area, western arctic coast, Canada: A long-term field study. *Geographie Physique et Quaternaire*, vol. 52, issue 3, pp. 271–323. <https://doi.org/10.7202/004847ar>
 13. Waltham T. 2008, Sinkhole hazard case histories in karst terrains. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 4, issue 3, pp. 291–300. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/07-211>
 14. Domanskaya O. V., Domanskiy V. O., Kulakova A. Yu. 2015, *Issledovaniye mikrobiologicheskoy i biokhimicheskoy aktivnosti merzlykh otlozheniy Zapadnoy Sibiri* [Study microbiological and biochemical activity of permafrost of western Siberia]. *Modern problems of science and education*, vol. 5, pp. 645–653. (In Russ.) URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21761>
 15. Melnikov V. P., Rogov V. V., Kurchatova A. N., Brouchkov A. V., Griva G. I. 2011, *Raspredeleniye mikroorganizmov v merzlykh gruntakh* [Distribution of microorganisms in frozen ground]. *Kriosfera Zemli*, vol. 15, issue 4, pp. 75–79. (In Russ.)
 16. Kuznetsov F. A., Istomin V. A., Rodionova T. V. 2003, *Gazovyye gidraty: istoricheskiy ekskurs, sovremennoye sostoyaniye, perspektivy issledovaniy* [Gas hydrates: historical excursus, current state, prospects for research]. *Rossiyskiy Himicheskij zhurnal*, vol. XLVII, issue, pp. 5–18. (In Russ.)
 17. *Chemist Handbook*, 1971, Ed. B. P. Nikolsky. 3rd ed., corrected. Moscow; Leningrad: Chemistry, vol. 2, 1168 p. (In Russ.)
 18. Vargaftik N. B. 1972, *Handbook of the thermophysical properties of gases and liquids*. Moscow, 721 p. (In Russ.)
 19. Tolpeshta I. I., Trofimov S. Y., Erkenova M. I., Sokolova T. A., Stepanov A. L., Lysak L. V., Lobanenko A. M. 2015, Laboratory simulation of the successive aerobic and anaerobic degradation of oil products in oil-contaminated high-moor peat. *Eurasian Soil Science*, vol. 3, pp. 314–324. <https://doi.org/10.1134/S1064229315030126>
 20. Zehnder A. J. B., Brock T. D. 1980, Anaerobic Methane Oxidation: Occurrence and Ecology. *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 9, issue 1, pp. 194–204.
 21. Atlas R. M. 1981, Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: An environmental perspective. *Microbiological Reviews*, vol. 45(1), pp. 180–209. [https://doi.org/0146-0749/81/010180-30\\$02.00/0](https://doi.org/0146-0749/81/010180-30$02.00/0)
 22. Heider J., Spormann A. M., Beller H. R., Friedrich Widdel. 1998, Anaerobic bacterial metabolism of hydrocarbons. *FEMS Microbiology Reviews*, vol. 22, issue 5, pp. 459–473. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.1998.tb00381.x>
 23. Boehrer B., Schultze M. 2008, Stratification of lakes. *Reviews of Geophysics*, vol. 46, issue 2, RG2005. <https://doi.org/10.1029/2006RG000210>
 24. Luk'yanov P. Y., Krylov S. D., Orlov A. O., Tsyrenzhapov S. V., Kharin Y. V., Shchegrina K. A. 2018, Heat and mass exchange in the meromictic soda Doroninskoe lake. *Water Resources*, vol. 45, issue 1, pp. 50–60. <https://doi.org/10.1134/S0097807818010128>
 25. Pimenov N. V., Kallistova A. Y., Rusanov I. I., Yusupov S. K., Montonen L., Jurgens G., Münster U., Nozhevnikova A. N., Ivanov M. V. 2010, Methane formation and oxidation in the meromictic oligotrophic Lake Gek-Gel (Azerbaijan). *Microbiology*, vol. 79, issue 2, pp. 270–276. <https://doi.org/10.1134/S0026261710020177>
 26. Kallistova A. Y., Merkel A. Y., Pimenov N. V., Tarnovetskii I. Y. 2017, Methane formation and oxidation by prokaryotes. *Microbiology*, vol. 86, issue 6, pp. 661–683. <https://doi.org/10.7868/S002636561706009X>
 27. Matyugina E. B., Belkova N., Borzenko S. V., Luk'yanov P. Y., Kabilov M., Baturina O., Martynova-Van Kley A., Nalian A., Ptitsyn A. B. 2018, Structure and diversity dynamics of microbial communities at day and night: investigation of meromictic Lake Doroninskoe, Transbaikalia, Russia. *Journal of Oceanology and Limnology*, vol. 36, issue 6, pp. 1978–1992. <https://doi.org/10.1007/s00343-018-7332-1>
 28. Epov M. I., Eltsov I. N., Olenchenko V. V., Potapov V. V., Kushnarenko O. N., Plotnikov A. E., Sinitsky A. I. 2014, Bermudskiy treugol'nik Yamala [The Bermuda triangle of Yamal]. *Science first hand*, vol. 59, issue 5, pp. 14–23. (In Russ.)
 29. Bordonskiy G. S., Krylov S. D., Gurulev A. A. 2020, Led 0 v prirodnoy srede. eksperimental'nyye dannyye i predpolagayemyye oblasti yego sushchestvovaniya [Ice 0 in the natural environment. experimental data and assumed areas of its existence]. *Led i Sneg*, vol. 60, issue 2, pp. 263–273. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2076673420020039>
 30. Quigley D., Alfè D., Slater B. 2014, Communication: On the stability of ice 0, ice i, and I_h . *Journal of Chemical Physics*, 2014. vol. 141, issue 16, 161102. <https://doi.org/10.1063/1.4900772>

The article was received on September 23, 2020