

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ГЕНЕЗИСА КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ВЫБРОСОВ ГАЗА И ОБРАЗОВАНИЯ ГИГАНТСКИХ КРАТЕРОВ В АРКТИКЕ

В. И. Богоявленский

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 1 декабря 2020 г.

Статья посвящена фундаментальным аспектам мощной взрывной дегазации Земли на севере Западной Сибири (преимущественно на Ямале). Приведены результаты комплексного анализа и обобщения большого объема фактических материалов, полученных в ходе экспедиционных исследований 2014–2020 гг. ряда объектов катастрофических выбросов газа. Показано, что большая часть выявленных на Ямале кратеров приурочена к зоне аномального теплового потока в районе Бованенковского месторождения. Обоснована модель процесса формирования газонасыщенных полостей в массивах подземного льда, бугров пучения, выбросов и самовоспламенений газа с формированием гигантских кратеров. Сформулированы основные закономерности мощной взрывной дегазации в Арктике.

Ключевые слова: Арктика, Ямал, Бованенковское месторождение, криолитосфера, термокарсты, геотермия, тепловой поток, плавление льда, газонасыщенные полости, газовые гидраты, аномально высокие пластовые давления (АВПД), дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ).

Введение

В 2014 г. мировое научное сообщество было потрясено видом гигантского кратера, обнаруженно-го пилотами вертолета в центральной части полуострова Ямал. Практически все специалисты в области наук о Земле признали данный объект новым феноменом российской Арктики, генезис которого требует серьезных исследований. При этом высказывались различные гипотезы, включая фантастические. Вскоре научной общественности стали известны еще несколько подобных кратеров. Абсолютное большинство экспертов признало, что выбросы обусловлены газодинамическими процессами [1–29].

Особый интерес к найденным кратерам вызван тем, что они расположены в уникальном по объемам ресурсов и запасов углеводородов Южно-Карском регионе глобального значения. В Южно-Карском регионе, включающем акваторию Карского моря (с Обской и Тазовской губами), полуостров Ямал и прилегающие территории суши, во времена СССР открыт ряд гигантских по запасам месторождений газа (Уренгойское, Ямбургское, Бованенковское, Русановское, Ленинградское и др.), входящих в перечень крупнейших месторождений мира. В последние годы на шельфе открыт ряд крупных место-

рождений (Северо-Обское, Победа, 75 лет Победы, им. Маршала Жукова, им. Маршала Рокоссовского и др.), дополнительно подтверждающих уникально высокую газонасыщенность региона. Наличие криогидросферы и криолитосферы с многолетнемерзлыми породами (ММП) делает процесс освоения месторождений очень сложным и дорогостоящим. При этом особо важными являются геозоологические исследования, направленные не только на сохранение экосистемы, но и на повышение безопасности функционирования нефтегазового комплекса.

Некоторые из найденных кратеров расположены вблизи или прямо на территории нефтегазовых промыслов и их инфраструктуры. Самый известный на Ямале Бованенковский кратер, получивший в ранее созданной геоинформационной системе «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО») Института проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН индекс С1 [2–17], образовался всего в 3,5 км от магистрального газопровода высокого давления «Бованенково — Ухта», а кратер С9 расположен вблизи железной дороги. Разброс кусков мерзлого грунта и льда достигает 200–400 м, а в одном случае — около 900 м [2; 4].

По состоянию на декабрь 2020 г. на территории севера Ямало-Ненецкого автономного округа и Красноярского края обнаружено около 20 объектов, которые с учетом различной степени из-

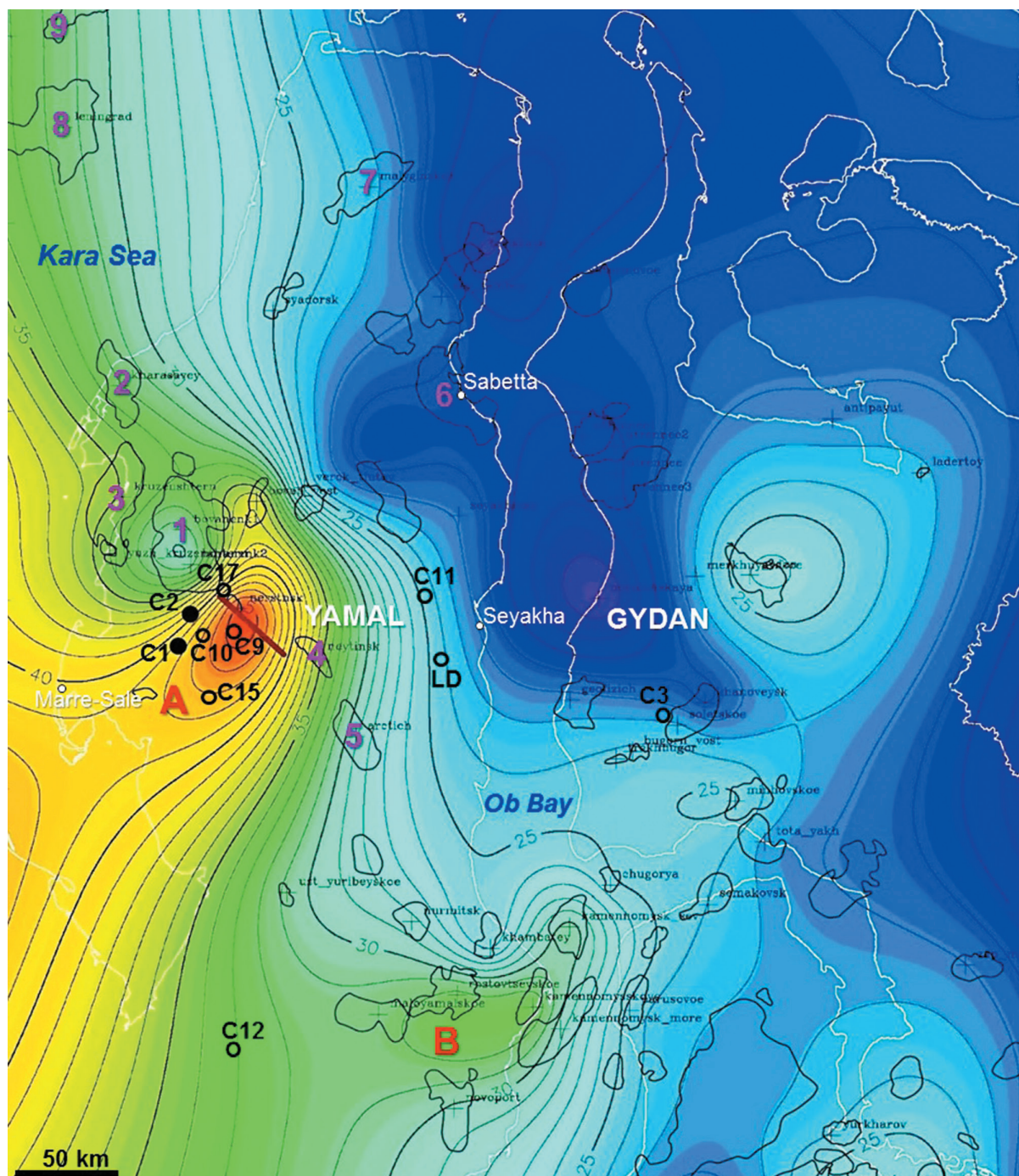


Рис. 1. Картографическая схема распределения кратеров выбросов газа и современных температур (°C) на глубине -1000 м ниже уровня моря в Южно-Карском регионе, построенная на основе 3D-моделирования по данным глубоких скважин. Обозначения: C1, C2, C3, C9, C10, C11, C12, C15 и C17 – кратеры выбросов газа; LD – озеро Открытие с кратерами на дне; месторождения (розовые цифры): 1 – Бованенковское, 2 – Харасавэйское, 3 – Крузенштернское, 4 – Нейтинское, 5 – Арктическое, 6 – Южно-Тамбейское, 7 – Малыгинское, 8 – Ленинградское, 9 – Русановское (Динкова); А и В – аномалии геотермического поля
 Fig. 1. A schematic map of the distribution of gas blowout craters and current geothermic field (°C) at the level of -1000 m bsl in the South Kara region, built based on 3D modeling based on deep well data. Legend: C1, C2, C3, C9, C10, C11, C12, C15 and C17 – gas blowout craters; LD – Lake Otkrytie with craters at the bottom; HC fields (pink numbers): 1 – Bovanenkovooskoe, 2 – Kharasaveyskoe, 3 – Kruzenshternskoe, 4 – Neitinskoe, 5 – Arctic, 6 – South-Tambeyskoe, 7 – Malyginskoe, 8 – Leningradskoe, 9 – Rusanovskoe (Dinkova); A and B are geothermal field anomalies

ученности и обоснованности могут быть отнесены к кратерам мощных выбросов газа [2—17]. Примерно половина этих объектов показана на рис. 1 (C1—C3, C9—C12, C15 и C17), при этом часть из

них ранее не упоминалась в научных публикациях. Другие объекты требуют дополнительных исследований (валидации) или находятся за пределами картографической схемы.

В 2014 г. генезис нового феномена был объяснен автором на основе очень ограниченного объема фактического материала и главным образом на накопленном опыте предыдущих исследований [2—4]. Были сформулированы основополагающие принципы физических процессов: термокарстовое формирование полости (cavity) в массиве подземного льда при его вытаявании (плавлении) аномально повышенным тепловым потоком (ТП) Земли в приразломной зоне; заполнение полости газом, мигрирующим в полость по субвертикальным или субгоризонтальным каналам; рост давления газа до аномально высокого, способного разрушить покрывающую толщу; мощный выброс (пневматический выхлоп) газа с его возможным самовоспламенением; формирование кратера и бруствера из обломков мерзлого грунта и льда. Последующий шестилетний период комплексных исследований показал, что основные сформулированные принципы и физические процессы верны.

В 2014—2020 гг. коллектив специалистов ИПНГ РАН, возглавляемый автором данной работы, провел широкий комплекс полевых исследований объектов мощных выбросов газа в Арктике, результаты которого в сочетании с данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, а также с помощью вертолетов и беспилотных летательных аппаратов значительно расширили ГИС «АМО» [5—17]. По данным ДЗЗ сверхвысокого разрешения, на полуострове Ямал впервые обнаружено 1860 зон активной дегазации с кратерами выбросов газа на дне термокарстовых озер, заливов и рек, а также 7185 локальных поднятий в рельефе местности, отождествляемых с многолетними буграми пучения (МБП), часть которых представляет потенциальную газозрывоопасность [10]. Установлена однозначная региональная связь найденных зон дегазации с районами повышенной концентрации метана в атмосфере, зафиксированными спектрометром TROPOMI [10]. Появились принципиально новые данные о процессах дегазации в Арктике [5—17].

Целью данной работы является выявление и обобщение закономерностей процессов формирования газонасыщенных полостей в массивах подземного льда, бугров пучения, выбросов, самовоспламенений и взрывов газа с образованием гигантских кратеров в Арктике на основе большого объема фактических материалов и результатов шестилетнего цикла работ 2014—2020 гг.

Распространение залежей подземного льда в криосфере Арктики

ММП являются хорошим региональным экраном на пути субвертикальной миграции газа. За счет этого большие объемы газа, мигрирующего к поверхности земли, накапливаются и распространяются в субгоризонтальных направлениях в поиске ослабленных зон, которыми являются талики, существующие под многими термокарстовыми озерами и крупными реками. В криосфере сосредото-

чен большой объем газа в свободном, гидратном и в растворенном в воде состояниях [1—4; 10; 16; 22; 24; 26 и др.].

В Арктике в приповерхностных частях ММП (обычно до 50 м, реже до 100—150 м) широко распространены залежи (массивы) подземного льда (пласты, жилы, линзы, ядра гидролаколлитов/булгунья/пинго) [30]. Исследованию генезиса происхождения залежей пластового льда посвящены многие десятки (возможно, сотни) работ [1, 31—37], при этом единое мнение до сих пор не сформировалось. Многолетними исследованиями установлено, что размеры залежей пластового льда могут достигать нескольких сотен метров и даже первых километров, площадь — до 10—15 км², мощность достигает и может превышать 30—45 м, а объем может быть больше 4 млн м³ [1; 2; 31—34; 38]. Наибольшая плотность распространения залежей пластового льда приурочена к центральной и западной частям Ямала (преимущественно в отложениях III морской террасы), особенно в районе Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) [31; 32]. В основном лед залегает на песчаных и супесчаных отложениях (нередко с криопэггами), а сверху перекрыт преимущественно глинами и суглинками [1; 32; 33; 35; 37].

Одной из важных закономерностей образования кратеров мощных выбросов газа (С1—С6, С10—С12, С15 и С17), установленной в 2014—2020 гг., является их приуроченность к массивам подземного льда [1—29]. Лед в зависимости от характера воздействия обладает различными упруго-пластическими свойствами (хрупкий от удара и текучий под длительным действием давления, в том числе собственного веса) и является практически непроницаемым для газа, что способствует его накоплению в возможных куполовидных ловушках из льда. Подобные свойства существуют и у ММП.

Геотермическое поле Ямальского региона

На рис. 1 в качестве картографической основы использована схематическая карта геотермического поля — распределения современных температур на глубине –1000 м ниже уровня моря, построенная нами в 2009 г. в результате трехмерного (3D) математического моделирования [39] на основе данных замеров температур в глубоких поисково-разведочных скважинах, пробуренных при нефтегазопосредствованиях во времена СССР. Отметим, что в 2008—2010 гг. нами был решен ряд задач по разномасштабному 3D-моделированию термобарических условий в Баренцево-Карском регионе, базирующемуся на фактических данных глубоких скважин, пробуренных при поиске и разведке месторождений углеводородов [39; 40]. Результаты моделирования в пакете программ Tigress (Geotrace) позволили выделить ряд аномальных зон и особенностей, рассмотренных в работах [2; 4; 39; 40]. Отметим наиболее важные из них.

На полуострове Ямал самые высокие современные температуры и геотермоградиенты выявлены на

Нурминском валу (до 4—4,4°C на 100 м), имеющем северо-западную ориентацию [2; 4; 39], особенно на его северном продолжении, к которому приурочены крупнейшие по запасам Бованенковское, Харасавэйское НГКМ и Крузенштернское ГКМ (суммарно около 8,7 трлн м³) (см. рис. 1). В зоне расположения этих месторождений аномально высокие пластовые давления (АВПД — давления, превышающие гидростатические более чем на 10—20%) зафиксированы в нижнемеловых отложениях (примерно с глубины 2000—2200 м), в то время как в региональном плане для Ямала и Гыдана — в основном в юрских (более чем на 1000 м глубже). Данная зона на современном уровне изученности является самой аномальной на суше Южно-Карского региона как по значениям АВПД (на глубинах 2400—3500 м коэффициент аномальности K_a достигает 1,8—2,05), так и по пластовым температурам (средние градиенты 3,6—4,4 °C/100 м). Наличие этих аномалий объясняется в основном поднятием доюрского фундамента и подтоком глубинных флюидов по системам субвертикальных трещин и разломов, доходящих в ряде случаев практически до поверхности земли.

На рис. 1 особо выделяется Нерстинско-Нейтинская аномальная зона (А) с самыми высокими температурами на глубинах 750—1500 м, захватывающая южный и восточный борты Бованенковского НГКМ. Здесь на глубине ~1000 м температуры достигают 41—45°C, что значительно выше, чем в центре самого НГКМ (30—36°C). Образование этой экстремальной зоны, прослеживаемой до максимальной глубины бурения и 3D-моделирования (4500 м), обосновывается рядом фактов, изложенных ниже.

При постоянном подтоке глубинного газа в сеноманскую залежь крупного Нейтинского НГКМ [2; 4; 41; 42] она по запасам газа намного меньше, чем на соседних месторождениях, что объяснимо возможной утечкой газа в атмосферу по пересекающимся системам разломов, выявленным на основании данных сейсморазведки и бурения [2; 4; 41; 42]. Именно на Нейтинско-Нерстинской площади существует разлом (показан на рис. 1 красным цветом) — единственный на Ямале, отмеченный на геологических картах России и прилегающих акваторий, изданных в 2004 и 2008 гг. [43]. В надсеноманском комплексе Нейтинского НГКМ установлен самый высокий на Ямале геотермоградиент — 5,08 °C/100 м [42, с. 244]. Свидетельством подтока глубинных газов до залежи сеномана Нейтинского НГКМ является наличие экстремально тяжелого изотопного состава углерода метана $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ –38,8‰ [2; 4; 41; 44], более характерного для юрского и нижнемелового комплексов. Газы сеномана соседних площадей характеризуются другими значениями $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$: около –48‰ для Бованенковского НГКМ (глубины с 520 м), от –47,6‰ до –56,5‰ для Арктического, Харасавэйского и Крузенштернского месторождений [2; 4; 41; 44]. В практически не нарушенном разломами Малыгинском НГКМ газ сеномана (глубина с 1070 м) имеет $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ –65,36‰ [2; 4; 41; 44].

Характерной региональной особенностью теплового поля Южно-Карского региона является существенно большая прогретость его западной части по сравнению с восточной, обусловленная относительно неглубоким залеганием фундамента и близостью Уральской складчатой системы, которая характеризуется максимальной для изучаемого региона плотностью теплового потока (ТП) 67—77 мВт/м² [45; 46]. При этом в центральной части Ямала ТП составляет в среднем около 53 мВт/м² [46], что практически совпадает со средними значениями ТП для Западно-Сибирской плиты (53—54 мВт/м²) и на 10—18 мВт/м² выше, чем на Сибирской платформе [47]. Вполне возможно, что относительно высокий уровень ТП Западно-Сибирской плиты «связан с восходящим теплопереносом в земной коре в эпоху формирования основных скоплений углеводородов» [47].

Отметим, что объем доступных данных о ТП в Арктике весьма ограничен, в связи с этим в работах разных авторов наблюдаются некоторые расхождения. В частности, на Ямале согласно [48] экстремум ТП 62 мВт/м² расположен в центре Бованенковского НГКМ (скважина 116). Согласно [45; 46] «относительно повышенные тепловые потоки наблюдаются на западном побережье Ямала и в Южно-Карской впадине (выше 70 мВт/м²)», при этом выделенная на Ямале аномалия ТП (примерно с 70° по 72° с. ш.) захватывает обширную территорию, включая Бованенковское, Харасавэйское НГКМ и Крузенштернское ГКМ. В морских скважинах Ленинградская-1 и Русановская-2 ТП достигает соответственно 73 и 76 мВт/м² [46]. В новейшей схеме ТП [45] выделяется «Западно-Ямальская положительная тепловая аномалия» (свыше 70—78 мВт/м²), захватывающая южные части Бованенковского и Крузенштернского месторождений, часть Байдарацкой губы (доходит до 68° с. ш.).

Геотермическая аномалия в западной части Ямала, подобная описанной выше, уверенно выделяется и на картографической схеме рис. 1. На ней четко обособился локальный экстремум геотермического поля (А) с центром на широте 70,1°, обрамляющий Бованенковское НГКМ с юга и востока. Еще в 2014 г. мы отметили, что два первых известных кратера (С1 и С2) «расположены в единой зоне максимального прогрева нижней части криолитозоны глубинными флюидами» [2; 4] — вблизи центра экстремума А. В итоге исследований 2014—2020 гг. констатируем факт, что абсолютное большинство (75%) кратеров, обнаруженных на Ямале и подтвержденных данными ДЗЗ с валидацией в полевых условиях, образовались именно в этой экстремальной зоне. При этом средняя широта шести компактно расположенных (участок 25×65 км) кратеров, показанных на рис. 1 (С1, С2, С9, С10, С15 и С17), также равна 70,1°. Исключение составляют лишь два кратера Сеяхинский (С11) и Еркутинский (С12), расположенные в других зонах. Однако кратер С12 также расположен в зоне аномально повышенного ТП Новопортовско-Камен-

номысской площади (см. рис. 1 — В), присутствующей и на схеме [45]. Также отметим, что в ГИС «АМО» имеются еще три недостаточно изученных кратероподобных объекта (в том числе С16, см. ниже), также попадающие в зону А.

Температуры ММП в Циркумарктическом регионе на глубинах нулевых сезонных амплитуд (НСА) меняются в широком диапазоне от нулевых и положительных значений в таликах до -15°C [49]. Результаты обобщений данных по многочисленным скважинам показали, что за счет потепления климата изменения НСА сильнее сказываются на наиболее холодных участках ММП [49]. На полуострове Ямал температура на глубине НСА в районе Марре-Сале в среднем близка к -5°C , а в районе Бованенковского НГКМ меняется от -4 до -5°C [1]. При этом мощность ММП на данном месторождении изменяется от 110—140 м в своде структуры до 260—290 м на его периферии, а нулевые изотермы расположены на глубинах от 170—190 м до 260—320 м [1, с. 119]. Это объясняется тем, что повышение содержания соли в пластовых водах (криопэги) понижает температуру замерзания воды $T_{\text{пл}}$ ниже 0°C .

Известно, что при увеличении давления $T_{\text{пл}}$ льда снижается. В частности, при давлениях 10 и 20 МПа (98,7 и 197,4 атм) $T_{\text{пл}}$ снижается примерно до $-0,74$ и $-1,5^{\circ}\text{C}$ [50; 51]. В основании массивов подземного льда на глубинах фактического залегания (до 30—50 м) давления веса толщ льда и, частично, мерзлого грунта могут достигать лишь уровня 0,4—0,6 МПа. За счет этого $T_{\text{пл}}$ снижается пренебрежимо мало — лишь до $-0,02^{\circ}\text{C}$ или $-0,04^{\circ}\text{C}$. Таким образом, этот эффект практически не влияет, и им можно пренебречь.

Проведенное в Институте криосферы Земли Сибирского отделения РАН физическое моделирование [52] показало, что при наличии диоксида углерода CO_2 увеличение давления существенно снижает $T_{\text{пл}}$. В частности, для практически чистого CO_2 (99,9%) при давлении 0,6, 1,0 и 2,06 МПа (5,9, 9,9 и 20,3 атм) $T_{\text{пл}}$ составляет соответственно около $-1,0$, $-1,45$ и $-3,2^{\circ}\text{C}$, что весьма существенно. При давлении свыше 2,06 МПа при $T_{\text{пл}} = -3,2^{\circ}\text{C}$ начинает формироваться гидрат CO_2 [52; 53]. Такие снижения могут оказать существенное влияние на активизацию дегградации ММП, включая залежи подземного льда. Практически во всех известных нам примерах состав газа в зоне ММП Ямала (и в других регионах Арктики также) был преимущественно метановый [1—4; 8—10; 21; 22; 36; 54; 55 и др.], а небольшие доли CO_2 очень мало влияют на процесс плавления льда или образования газогидратов, о чем свидетельствуют данные [53]. Исключение по составу газа в кратере С1 приведено в работе [27], в которой он представлен как преимущественно CO_2 . Однако этот пример мы относим к недоразумению, вызванному неверными представлениями о произошедших геологических и физико-химических процессах формирования залежи газа под МБП, основанными на классической криогенной модели образования бул-

гуньяха-пинго при игнорировании многих фактов, накопленных в 2017—2018 гг. [2—7; 19; 21—25].

Известно, что ТП в зонах активных разломов (особенно в зонах их пересечения) может многократно превышать фоновый уровень [45—47]. В частности, при среднем для Байкала ТП 71 ± 21 мВт/м² в районах разломов он достигает аномальных значений 100—200 мВт/м², а в зонах разгрузки трещинных гидротерм может даже превышать 250—3000 мВт/м² [56]. В Арктике аномально повышенный ТП существует вдоль хребтов Гаккеля (от 100 до 585 мВт/м²) и Книповича (230 и 301 мВт/м²) [46].

Обобщая вышесказанное, отметим, что полуостров Ямал «разбит густой сетью разломов» [1, с. 51], при этом Нурминский мегавал характеризуется одной из «наибольших плотностей дизъюнктивных нарушений» [42, с. 100]. Локальные аномалии повышенного ТП, обычно приуроченные к зонам развития разломов, способны существенно изменить пластовые температуры, сформировать в ММП талики и инициировать приуроченные к ним термокарстовые процессы, завершающиеся образованием просадочных форм рельефа — котловин термокарстовых озер. Очевидно, что повышенный в приразломных зонах ТП также способен расплавить массивы подземного льда, залегающие вблизи поверхности земли и широко распространенные на полуострове Ямал и в других арктических регионах.

Таким образом, за счет действия аномального ТП термокарстовые процессы формирования таликов и плавления льда происходят снизу, а не сверху, как при экзогенных процессах, с которыми в геокриологии (мерзлотоведении) традиционно связывается образование термокарстовых озер. За счет протавивания ММП снизу возможно формирование внутренних разуплотненных и просадочно-провальных зон, включая полости. Их образованию наиболее подвержены высокольдистные породы и особенно залежи подземного льда. Поступление в разреженные зоны или полости флюидов способно компенсировать возникающий дефицит пластовых давлений, а за счет выделения газа создать АВПД, превышающие гидростатические давления с коэффициентами аномальности K_a до 2,0—2,3 или даже сверхвысокие давления (СВД — сверхлитостатические давления) $K_a \gg 2,3$ [9].

При значительной высоте h газовой залежи (в нашем случае газонасыщенной полости) давления в ее верхней и нижней частях (в частности, в своде и около газоводяного контакта — на глубинах z и $z + h$) различаются незначительно, что обусловлено многократно (около 10^3 раз) меньшей плотностью (весом) газа по сравнению с водой [9]. Однако в верхней и нижней частях залежи K_a^b и K_a^h могут различаться на десятки и даже сотни процентов. Причем наиболее сильны различия K_a при небольших (приповерхностных) глубинах расположения залежи газа (так создаются СВД). Это обусловлено тем, что

$$K_a^b(z, h) = K_a^h(z, h)(1 + h/z). \quad (1)$$

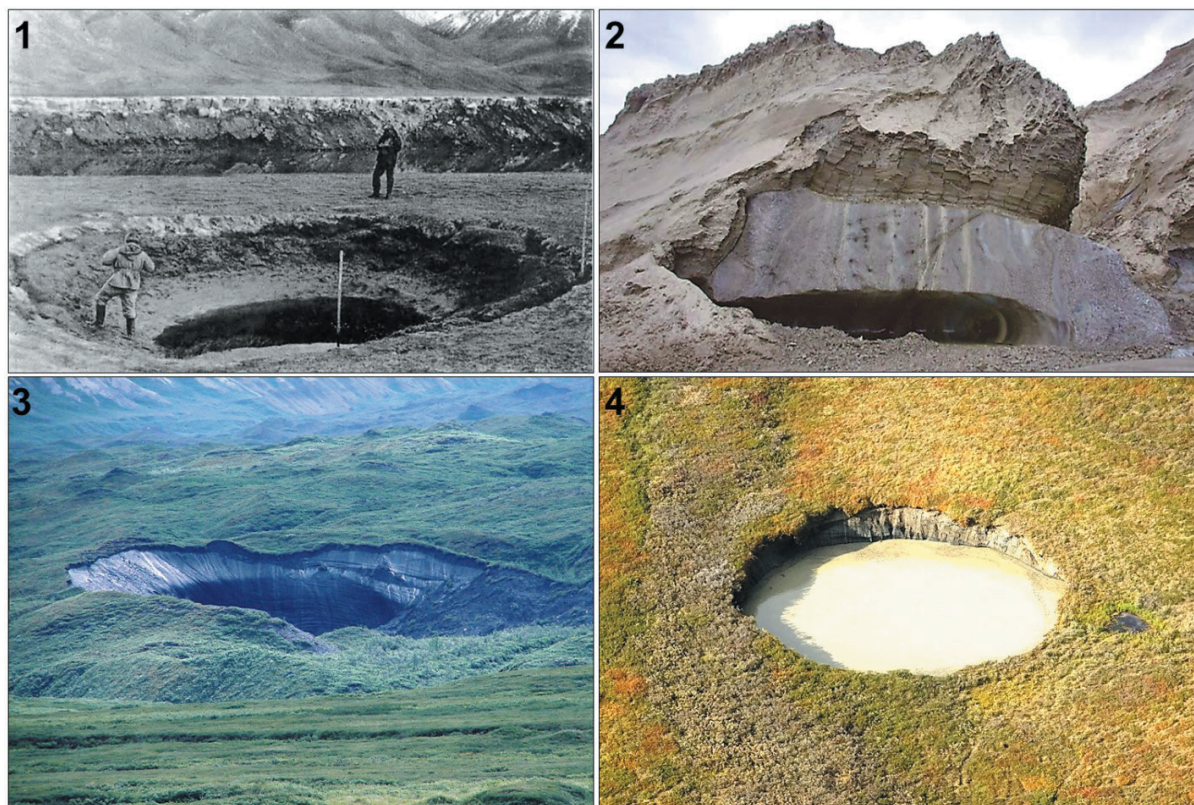


Рис. 2. Термокарстовые кратер на Тянь-Шане (1) [57], обнажение подземного льда с пустотным пространством в южной части Ямала (2) (фото С. Гаврилова, 2009 г. [58]), кратер на Аляске в Национальном парке Денали (3) (фото Greenpeace New Zealand, Flickr.com, 8 июля 2006 г.), кратер С16 на Ямале (4) (фото В. Богоявленского, 26 августа 2020 г.)
 Fig. 2. Thermokarst crater in the Tien Shan (1) [57], outcrop of underground ice with cavity in the southern part of Yamal (2) (photo by S. Gavrilov, 2009 [58]), a crater in Alaska in Denali National Park (3) (photo by Greenpeace New Zealand, Flickr.com, July 8, 2006) and crater C16 on Yamal (photo by V. Bogoyavlensky, August 26, 2020)

СВД также могут формироваться при наличии открытых газоподводящих каналов (газовых труб — gas chimneys, gas pipes), которыми в частности являются эруптивные каналы грязевых вулканов. АВПД и СВД, создаваемые газодинамическим процессом, способны привести к формированию МБП. В итоге СВД газа способны разорвать (взорвать) покрывающую толщу за счет газодинамического процесса, что кардинально отличается от криогенного процесса, характерного для формирования классических МБП типа булгуннях/пинго/гидролакколит [9]. По физической сути реализации описанный газодинамический процесс практически аналогичен происходящим при строительстве шахт катастрофическим взрывам метана, что ранее подробно рассмотрено автором [9].

Необходимо отметить, что крупные полости и термокарстовые провалы в криолитосфере неоднократно обнаруживались ранее в различных регионах развития ММП. На рис. 2.1 приведен пример термокарстовой воронки, образовавшейся на месте МБП около озера Чатыр-Кель на Тянь-Шане и имеющей практически цилиндрический ствол [57, с. 317]. Судя по отсутствию кусков выброшенной породы вокруг этого кратера, он образовался при обрушении свода МБП при локальном плавлении подземного льда.

На рис. 2.2 приведен пример обнажившейся полости в массиве подземного льда в южной части Ямала в низовьях реки Еркутаяхи [58]. Очевидно, что эта полость сформировалась не за счет экзогенных процессов.

На Аляске в Национальном парке Денали существуют кратероподобные провалы в массивах подземного льда (рис. 2.3). Судя по рельефу местности, до кратера здесь существовало локальное поднятие, наиболее вероятно, МБП. Однако следов выброса мерзлой породы не видно. Наклонные стенки верхней части льда можно объяснить их таянием под действием солнечной радиации. Подобный объект (С16), но уже затопленный водой, был обнаружен в 2020 г. на Ямале (рис. 2.4). По данным ДЗЗ, до его образования существовал МБП, что свидетельствует о наличии флюидодинамических давлений, однако следов выброса мерзлого грунта не видно. При образовании кратеров (рис. 2.3 и 2.4) предположительно произошла разгрузка внутреннего давления газа через трещины и/или боковые каналы, после чего покрывка полости обрушилась на ее дно. Также отметим, что в ММП на западном побережье канадской Арктики были найдены подземные полости/пещеры (cavity/cave [38]), образование которых геокриологи связали с залежами метана [38; 59].

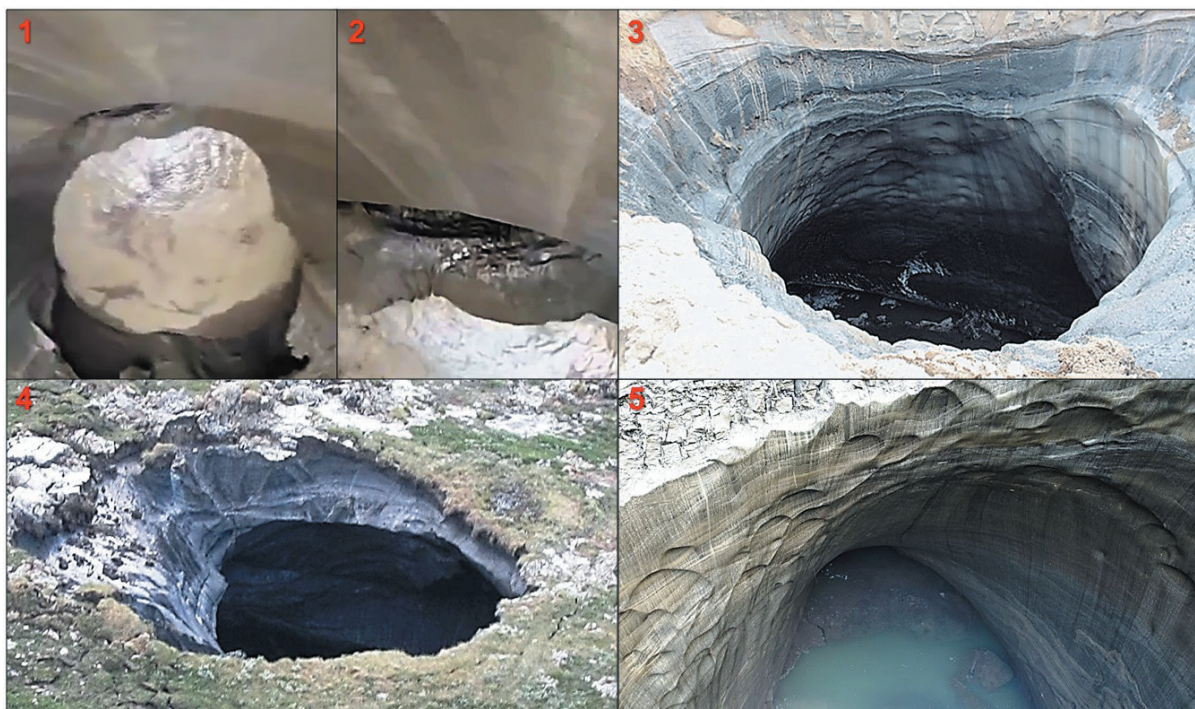


Рис. 3. Крупные каверны, гроты и частично сохранившиеся своды подземных полостей на кратерах: С1 (1, 2 – скриншот видео ГТРК «Ямал», 16 июля 2014 г.), С3 (3 – фото М. Лапсуй, 19 июля 2014 г.), С5 (4 – фото предоставлено А. Осокиным) и С17 (5 – фото И. Богоявленского, 26 августа 2020 г.)

Fig. 3. Large caverns, grottoes and partially preserved arches of underground cavities on craters: C1 (1, 2 – screenshot of the Yamal State TV-Radio Company video, July 16, 2014), C3 (3 – photo by M. Lapsuy, July 19, 2014), C5 (4 – photo provided by A. Osokin) and C17 (5 – photo by I. Bogoyavlensky, August 26, 2020)

Способность эндогенных процессов сформировать полости в массивах подземного льда (ледяные/снежные пещеры — ice save [30]) за счет его плавления хорошо известна вулканологам и гляциологам. Имеется ряд подтверждающих примеров, включая стратовулканы Reiner (США, штат Вашингтон, 46,85° N, -121,76° W), Erebus (Антарктида, 77,53° S, 167,17° E), Hofsjökull (Исландия) и Мутновский (Камчатка, 52,453° N, 158,195° E) [60—63]. В частности, в леднике, залегающем на ММП склонов вулкана Erebus, обнаружена сеть фумарольных пещер [61]. В результате действия ТП и выходящих из фумарол разогретого газа (преимущественно CO_2) и пара образовались многочисленные (более 100) протяженные (до нескольких сотен метров) фумарольные ледяные пещеры (fumarolic ice cave) [61]. При этом на поверхности ледника выросли мощные ледовые башни высотой до 10—12 м, через которые пар и газ разгружаются в атмосферу.

В обследованных кратерах на севере Западной Сибири (С1-С6, С11, С12, С15 и С17) наблюдались разрывы верхней части массива подземного льда по конической поверхности и/или были выброшены куски льда. Из этого следует, что во время взрыва верхняя часть этого массива льда еще существовала, а это однозначно свидетельствует, что газонасыщенная полость формировалась за счет плавления льда снизу при воздействии эндогенных процессов, а не сверху за счет экзогенных процессов, как обыч-

но предполагается в мерзлотоведении при объяснении термокарстовых процессов.

Объем обнаруженной на бруствере кратера С1 породы (около 1940 м³ [18]) оказался почти в шесть раз меньше объема кратера (11 200 м³ [18]) не потому, что «большая часть выброшенного материала (9260 м³) представляла собой лед» [18, с. 25], который растаял, а потому, что в массиве льда была газонасыщенная полость объемом свыше 9000 м³, а выброшенная порода — верхняя часть крыши этой полости. При этом нижняя часть крыши состояла из сохранившейся на момент выброса верхней части слоя подземного льда. Отметим, что спустя несколько лет авторы [18] признали наличие полости [25].

Внизу ряда обнажившихся и обследованных кратеров (С1, С3, С5, С12 и С17) до затопления их водой наблюдались крупные (многометровые) каверны и гроты (возможно, пещеры) (рис. 3.1—3.3), а также хорошо сохранившиеся части сводов подземных полостей (рис. 3.4 и 3.5). Образование крупных уплощенных каверн объяснимо за счет отколов льда воздействием ударной волны взрыва. На рис. 3.1 и 3.2 в стене кратера С1 виден крупный грот — один из нескольких вероятных каналов притока газа и грунтовых вод. Видимо, преимущественно подземные источники грунтовых вод способствовали быстрому поднятию уровня воды в кратере С1 и его затоплению в течение двух лет.



Рис. 4. Каверны на стенах полостей в массивах подземного льда в кратерах выбросов газа: 1 – С1, 2 – С12, 3 – С17 (фото В. Богоявленского 2014, 2017 и 2020 гг.), 4 – С3 (фото М. Лапсуй, 2014 г.)

Fig. 4. Caverns on the walls of underground ice massifs in the gas blowout craters: 1 – C1, 2 – C12 and 3 – C17 (photo by V. Bogoyavlensky, 2014, 2017 and 2020), 4 – C3 (photo by M. Lapsuy, 2014)

Особо отметим специфическую форму полости объекта С17, обследованной 26 августа 2020 г. с помощью БПЛА (рис.3.5), впервые выполнившего аэрофотосъемку в подземных условиях (сертифицированный внешний пилот И. Богоявленский) [11, 16]. В результате фотограмметрической обработки построена 3D модель подземной полости и установлено, что продолговатую форму её дна можно аппроксимировать эллипсом с главными осями 61,5 и 14 м (коэффициент сжатия 0,228) [16]. При этом был сделан вывод, что первоначально в приразломной зоне в нижней части ледового массива формировалась не одна, а как минимум две полости, которые по мере увеличения объединились [16].

В июле-сентябре 2014 г. на обнажившихся гладких субвертикальных стенках Бованенковского кратера С1 наблюдались (см. рис. 4.1) округлые плоские каверны диаметром 0,5—1,2 м и глубиной в центральной части до 5—15 см. Аналогичные каверны были обнаружены позднее на всех доступных для исследования гладких стенах других кратеров (С3, С4, С5, С12 и С17) (см. рис. 3.3, 3.5, 4.2—4.4).

Подобные каверны образуются на стенах и сводах широко распространенных в мире ледяных/снежных пещер [30], сформировавшихся в нижней части горных ледников/снежников за счет неравномерного плавления льда/фирна/снега под действием восходящего ТП и газа из недр Земли, а также от потоков воды, протекающей на границе грунт-лед

(горные ручьи, небольшие реки, водопады). В частности, такие каверны повсеместно наблюдаются в ледяных пещерах, сформировавшихся в ледниках на склонах ряда стратовулканов: Reinier (рис. 5.1) [64], Мутновский (рис. 5.2) [63] и Erebus [61]. Таким образом, плоские каверны, наблюдаемые на поверхностях гладких стен и частично сохранившихся сводов кратеров выброса газа на севере Западной Сибири, свидетельствуют о формировании газонасыщенных полостей в залежах подземного льда.

В работе автора [9] сформулированы три основных эндогенных механизма формирования полостей в приповерхностных отложениях: терморкарстовый, суффозионный и газодинамический. Также отмечено, что полости могут образоваться под комплексным воздействием различных комбинаций из перечисленных механизмов. В частности, в криолитосфере сочетание суффозионных и термокарстовых явлений (термосуффозионный процесс) активизирует формирование полостей (пещер), проседаний и провалов поверхности земли. При этом в полости могут обрушаться тающие ММП, до обрушения выполнявшие роль крышки этой полости.

Термосуффозионными процессами объясняется образование многочисленных провалов (воронки) диаметром до 30 м и глубиной до 15 м на поверхности земли в Центральной Якутии, в районах развития ММП мощностью до 200—400 м [65]. Возможно, что формирование полости, показанной на рис. 2.2,

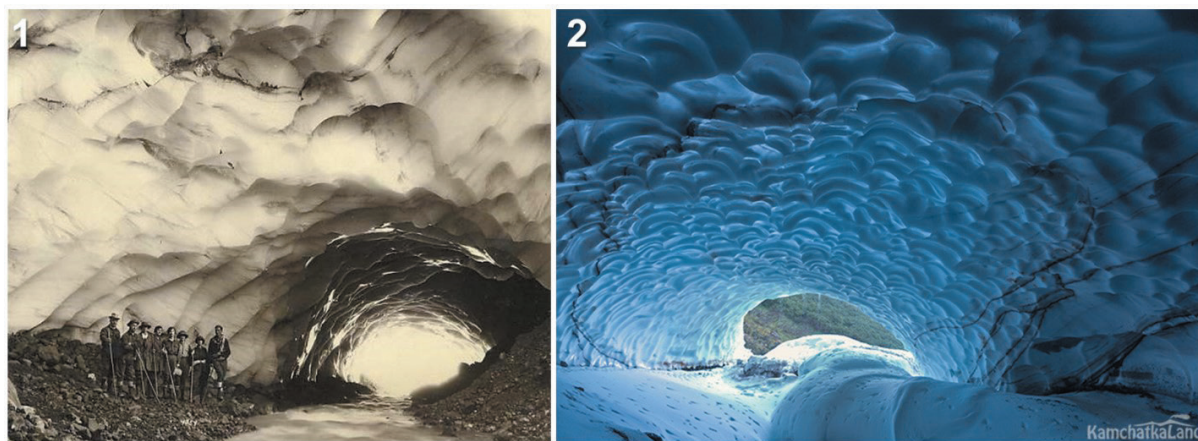


Рис. 5. Каверны на стенах массивов льда в ледяных пещерах: 1 – ледника Paradise на склоне горы Рейнир (фото М. Pelto [64]), 2 – ледника вулкана Мутновский (фото KamchatkaLand [63])
 Figure 5. Caverns on the walls of ice massifs in ice caves: 1 – Paradise Glacier on the slope of Mount Rainier (photo by M. Pelto [64]), 2 – the glacier of the Mutnovsky volcano (photo by KamchatkaLand [63])

происходило также при совокупных термосуффозионных процессах. Отметим, что наличие в подземной полости воды или газа с АВПД предохраняет ее свод от обрушения.

Таким образом, эндогенные процессы (ТП, давление, газогидродинамика, физико-химические реакции) являются основополагающими в процессе формирования газонасыщенных полостей. Влияние потепления климата, повысившего на обширных территориях температуру ММП (в том числе и подземного льда) на глубинах до 10–20 м на 1–2°C, несколько снижает упруго-прочностные свойства ММП. Это может повлиять на расширение территории и облегчение воздействия аномальных зон ТП на плавление льда с формированием полостей и ускорение процесса выброса газа. Однако эндогенные процессы имеют основное (первопричинное) значение.

Обобщающая модель катастрофических выбросов газа

Применительно к криосфере Земли рассмотрим обобщающую модель формирования газонасыщенных полостей в массивах подземного льда, а также газодинамического развития бугров пучения на поверхности земли, выбросов (взрывов) газа, образования гигантских кратеров и их трансформации в термокарстовые озера. На рис. 6 приведены шесть стадий локальных преобразований трехслойной среды в приповерхностной части разреза ММП с залежью пластового льда под действием аномального ТП и газогидродинамического процесса в зоне разлома (субвертикальной трещиноватости) и приуроченного к нему талика.

На первой стадии в нижней части массива льда происходит его локальное плавление и формирование небольшой полости, имеющей куполовидную или вытянутую вдоль разлома форму (см. рис. 6.1). При этом в ней возникает разрежение давления из-за меньшего объема выделившейся воды по сравнению с объемом растаявшего льда. За счет субвертикаль-

ной миграции газа (в свободном состоянии или в виде раствора в воде) из зон высокого давления в сторону более низкого происходят компенсация дефицита давления с насыщением сводовой части полости газом в свободном состоянии и постепенный рост давления до и выше гидростатического — возникает АВПД. Высвобождающаяся при плавлении льда вода отжимается АВПД газа в нижележащие отложения — резервуары. В процессе продолжающегося плавления льда и увеличения размеров полости и талика (см. рис. 6.1 — пунктирные линии) происходит рост коэффициента аномальности K_a давления газа согласно формуле (1). Увеличение размеров талика может привести к формированию в зоне талика под пластовым льдом линзовидного проседания поверхности осадочной толщи (на схеме рис. 6 не показано).

На второй стадии (см. рис. 6.2) наряду с продолжающимся плавлением льда и увеличением размеров полости АВПД газа начинает оказывать значительные воздействия на вышележащие приповерхностные отложения (упруго-вязко-пластической среды [5]), при этом происходят их деформация и формирование бугра газодинамического пучения — полусферической покрывки полости. При неравномерном плавлении льда образуются небольшие пологие каверны на стенках полости.

На третьей стадии (см. рис. 6.3) на пределе прочностных свойств увеличивающейся в размерах покрывки (бугра) в ней начинают формироваться разрывы (трещины), за которыми следует четвертая стадия (см. рис. 6.4) — выброс (пневматический выхлоп) газа и разрушенных кусков мерзлой породы покрывки, включая остатки верхней части массива подземного льда (см. рис. 6.3). При этом в воздушной среде формируются различные концентрации метана, в том числе взрывные (5–16%). За счет возникающей электризации пространства и электростатических разрядов [8; 9] возможно самовоспламенение и взрыв газа, что значительно усиливает силу взрыва и разброс кусков мерзлой породы и ледогрунта (см.

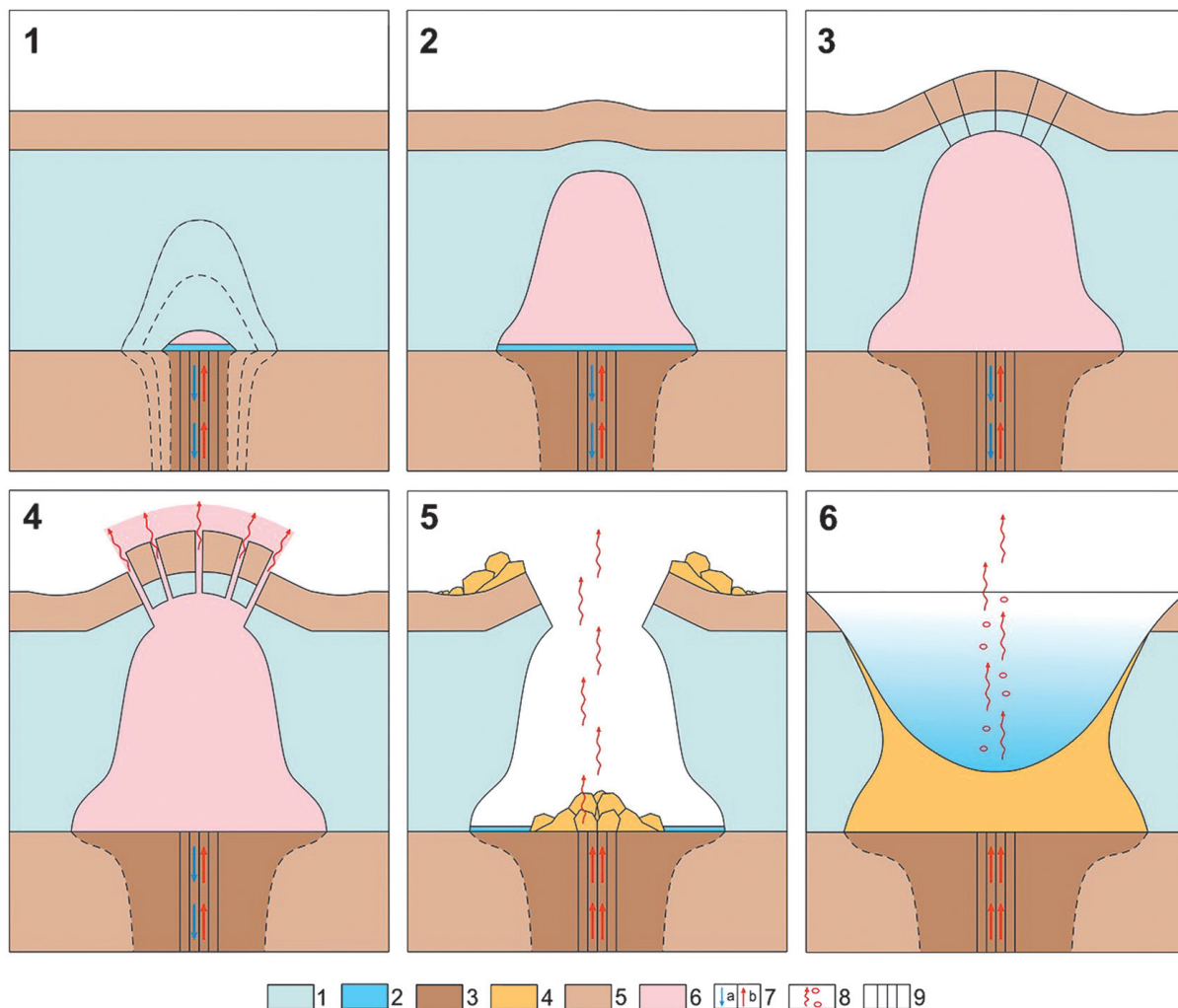


Рис. 6. Комплексная схематическая модель формирования полостей в массивах подземного льда, бугров пучения и выбросов газа с образованием гигантских кратеров в криосфере Земли. Обозначения: 1 – лед, 2 – вода, 3 – талая порода в зоне разлома (талики), 4 – талая переотложенная порода, 5 – мерзлые породы (включая активный/сезонноталый слой), 6 – газ, 7 – восходящие и нисходящие потоки воды (а) и газа (b) по разлому, 8 – восходящие потоки газа в водной толще и атмосфере, 9 – разлом (субвертикальные трещины)

Figure 6. A complex schematic model of the formation of cavities in the massifs of underground ice, heaving mounds and gas blowouts with the formation of giant craters in the cryosphere of the Earth. Legend: 1 – ice, 2 – water, 3 – thawed rock in the fault zone (talik), 4 – thawed redeposited rock, 5 – frozen rocks (including active/seasonally thawed layer), 6 – gas, 7 – ascending and descending flows of water (a) and gas (b) along the fault, 8 – ascending gas flows in the water column and atmosphere, 9 – fault (subvertical fractures)

рис. 6.4). Воздействие ударной волны в нижней части полости на границе лед-грунт (гrotы) может выкалывать из массива льда куски и образовывать крупные каверны. На пятой стадии (см. рис. 6.5) часть выброшенной породы, полетевшая вертикально, падает на дно обнажившейся полости и может полностью перекрыть канал вертикальных флюидопотоков.

На шестой стадии (рис. 6.6) происходит термоденудация стенок кратера и полости под действием эндогенных и экзогенных процессов, включая летнее тепловое воздействие. Полость заполняется водой из подземных резервуаров (в том числе из криопэгов), поверхностных источников (атмосферных осадков, талых вод) и, в меньшей степени, от плавления ледяных стенок полости. Размер подземной полости увеличивается, дно мелеет за счет заполнения осадками (оползневые процессы). В течение одного-двух лет формируется новое термокарстовое озеро.

Отметим, что первая, вторая и шестая стадии являются длительными и могут продолжаться годами. Третья, четвертая и пятая стадии (см. рис. 6.3—6.5) быстрые — от часов и дней (стадия 3) до секунд и минут (стадии 4 и 5).

Необходимо дополнительно отметить, что рис. 6 иллюстрирует обобщающую модель происходящих процессов формирования газонасыщенных полостей и выбросов (взрывов) газа. На основе сформулированных выше потенциальных физико-химических процессов плавление льда и формирование полости возможно даже без аномального ТП. Однако очевидно, что наполнение полости газом из микровключений в плавящемся льду невозможно из-за крайне малого суммарного объема газа. Таким образом, наличие каналов подтока газа в полость является обязательным условием его последующего выброса (взрыва).

В формирующуюся подземную полость газ может поступать при выделении из раствора в воде (декомпрессия), а также из расположенных внутри или ниже ММП обособленных залежей, в которых он содержится в свободном или гидратном состояниях. Такие залежи в криолитозоне обнаружены в результате бурения скважин на ряде площадей АЗРФ, включая район Бованенковского НГКМ [1—4; 16; 44; 54; 55]. Отметим, что процесс возможной диссоциации газогидратов в условиях замкнутого (подземного) пространства и отрицательных температур ММП должен быстро остановиться за счет выделения и замораживания воды и роста давления из-за частично выделившегося газа. На этом основан неоднократно доказанный эффект самоконсервации газогидратов и их существования в метастабильном состоянии в зонах ММП при дефиците геостатического давления [4; 9; 54; 55]. Однако при диссоциации газогидрата в зоне расширяющегося талика (рис.6) могут выделяться огромные объемы газа, способные заполнить полость и создать в ней АВПД и даже СВД.

В ряде кратерных озер (С1, С3, С11 и озеро Открытие) выявлена непрерывная и/или периодическая эмиссия (включая мощные выбросы) газа, свидетельствующая о вулканическом генезисе извержений. По ГОСТ Р 57123-2016 четко определен основной признак грязевого вулкана — «геологическое образование, постоянно или периодически извергающее грязевые массы и газы». При этом отмечается широко известная приуроченность грязевых вулканов к разломам, что хорошо коррелируется с выводами о генезисе кратеров выбросов газа в Арктике.

Выбросы газа инициируют сейсмические события, но и сами могут быть ими инициированы. Хотя в целом Южно-Карский регион считается асейсмичным, в нем фиксируется множество слабых землетрясений (магнитудой до 3) [4, с. 111]. Примерно в 1400 км к северу от Ямала расположен сейсмоактивный хребет Гаккеля, на котором периодически происходят мощные подводные извержения стратовулканов (в том числе 22 октября 2016 г.), способные быть триггером и активизировать процессы дегазации [4]. Это направление исследований требует серьезного развития.

Заключение

Комплексный анализ процессов мощных выбросов газа в Арктике в 2014—2020 гг. (с учетом [1—29]) позволил сформулировать следующие основные закономерности.

1. Выбросы газа произошли в местах развития небольших МБП (высоты до 2—8 м) преимущественно на водоразделах морских террас или их термоэрозийных склонах и долинах (С1—С6, С9, С10, С15, С17), в том числе около небольших озер (С1, С4). Три кратера приурочены к руслам и долинам рек (С9, С11, С12). Эти места не характерны для образования классических МБП криогенного генезиса (булгуньяхи/пинго), формирующихся в закрытых системах хасыреев.

2. Во всех наиболее хорошо обследованных/задокументированных кратерах (С1—С6, С10—С12, С15

и С17) существовал подземный лед с доказанной максимальной мощностью около 30 м (С1 и С17), перекрытый небольшой толщей (от первых метров до 6—11 м в С1 и С17) глинистых, суглинистых или песчаных мерзлых и сезонно талых грунтов.

3. Большинство кратеров (С1, С2, С9, С10, С15 и С17) образовалось в зоне экстремального теплового потока, обнаруженной ранее по данным бурения глубоких скважин [2; 4; 39; 40].

4. До взрывов в массивах подземного льда были заполненные газом подземные полости (подтверждено для объектов С1, С3, С5, С11, С12 и С17).

5. В большинстве случаев выбросы (пневматические выхлопы — взрывы) газа имеют огромную мощность. Это подтверждается большой удаленностью разлета выброшенных взрывом кусков мерзлых пород и ледогрунта (до 300—900 м) и гигантскими размерами отдельных кусков, измеряемыми десятками кубометров (рекордный на кратере С11 — 100—150 м³) [8; 9; 14], и свидетельствует о наличии в полостях АВПД газа.

6. Представители коренного населения — очевидцы выбросов газа на трех объектах (С3, С11 и С12) свидетельствуют о самовоспламенениях и взрывах газа во всех трех случаях [7—9]. Самовоспламенение и взрывы наблюдались в процессе ряда природных и техногенных выбросов газа в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) и других регионах мира. Одной из основных причин этих событий являются электростатические разряды электризованного пространства [8; 9].

7. В итоге мониторинга развития кратеров с применением ДЗЗ установлено, что в течение двух-трех лет они превращаются в обычные для тундры озера с небольшой (до 3—15 м) глубиной.

8. В ряде кратерных озер (С1, С3, С11 и озеро Открытие) продолжается эмиссия газа [6—10; 13—16; 22], свидетельствующая о вулканическом генезисе извержений [2—4; 6—10; 13—16].

9. При статистическом анализе распространения 7185 МБП и 1860 зон активной дегазации со дна водоемов с кратерами на дне установлено, что наибольшим риском выбросов газа характеризуется восточная часть полуострова Ямал, а экстремальными являются Южно-Тамбейская и Северо-Сеяхинская зоны [11].

10. Состав и генезис газа, исследованные в разной степени на трех объектах (С1, С11 и С12), свидетельствуют о преимущественном содержании метана, а изотопный анализ углерода метана показал его биогенный генезис [1—4, 8—10, 21, 22, 36, 54, 55]. Возможно, газ имеет смешанный характер (биогенный и катагенетический). Об этом свидетельствует наличие в пробе газа из кратера С1 метана термогенного генезиса с тяжелым изотопным составом углерода [22], а также наличие этана и пропана в газе из кратера С12 [28].

Все приведенные выше факты однозначно подтверждают сформулированную в 2014 г. автором [2—4] модель образования газонасыщенных полостей в массивах подземного льда, а также последую-

ющих газодинамических процессов, включая мощные выбросы-взрывы газа.

Аналогов мощных выбросов газа в АЗРФ в арктических зонах других стран пока не обнаружено, но это не означает их отсутствие. Первое выявление данного феномена в АЗРФ может быть объяснено двумя факторами — север Западной Сибири является самой крупной газоносной провинцией мира, при этом именно в российской Арктике ведется наиболее активное освоение природных ресурсов, что подразумевает больший уровень проведенных исследований и накопленных знаний.

Работа выполнена по государственному заданию по теме «Рациональное природопользование и эффективное освоение нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли» (№ АААА-А19-119021590079-6).

Автор признателен: Российской академии наук и Правительству Ямало-Ненецкого автономного округа за постоянную поддержку научных исследований в Арктике, ПАО «НОВАТЭК» и ОАО «Ямал СПГ» за большую неоднократную помощь в организации экспедиционных работ, ПАО «Газпром» за содействие научным исследованиям.

Литература/References

1. Баду Ю. Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи. — М.: Науч. мир, 2018. — 232 с.
Badu Y. B. Cryogenic stratum of gas-bearing structures of Yamal. On the influence of gas deposits on the formation and development of a cryogenic stratum. Moscow, Nauch. mir, 2018, 232 p. (In Russian).
2. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала // Бурение и нефть. — 2014. — № 9. — С. 13—18.
Bogoyavlensky V. I. The threat of catastrophic gas blowouts form the Arctic cryolithozone. Yamal craters. Burenie i neft', 2014, no. 9, pp. 13—18. (In Russian).
3. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. — Ч. 2 // Бурение и нефть. — 2014. — № 10. — С. 4—8.
Bogoyavlensky V. I. The threat of catastrophic gas blowouts form the Arctic cryolithozone. Yamal and Taumyr craters. Pt. 2. Burenie i neft', 2014, no. 10, pp. 4—8. (In Russian).
4. Богоявленский В. И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов: Монография // Тр. Вольного экон. о-ва. — 2014. — Т. 182, № 3. — С. 12—175.
Bogoyavlensky V. I. Arctic and the World Ocean: current state, perspectives and challenges of hydrocarbon production. Tr. Volnogo ekon. o-va, 2014, vol. 182, no. 3, pp. 12—175. (In Russian).
5. Богоявленский В. И., Гарагаш И. А. Обоснование процесса образования кратеров газового вы-

броса в Арктике математическим моделированием // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 3 (19). — С. 12—17.

Bogoyavlensky V. I., Garagash I. A. Substantiation of the process of formation of gas emission craters in the Arctic by mathematical modeling. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2015, no. 3 (19), pp. 12—17. (In Russian).

6. 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.

Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Results of aerial, space and field investigations of large gas blowouts near Bovanenkovo field on Yamal Peninsula. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2017, no. 3 (27), p. 4—17. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-4-17. (In Russian).

7. Богоявленский В. И. Газогидродинамика в кратерах выброса газа в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 1 (29). — С. 48—55.

Bogoyavlensky V. I. Gas-hydrodynamics in the Arctic craters of gas blowout. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2018, no. 1 (29), pp. 48—55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55. (In Russian).

8. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Мажаров А. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 1 (33). — С. 88—105.

Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Mazharov A. V., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kargina T. N., Kishankov A. V. Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the Seyakha catastrophic gas blowout on the Yamal Peninsula. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2019, no. 1 (33), pp. 88—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47. (In Russian).

9. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Гор. пром-сть. — 2020. — 1 (149). — С. 97—118.

Bogoyavlensky V. I. Natural and technogenic threats in fossil fuels production in the Earth cryolithosphere. Gor. prom-st', 2020, no. 1 (149), pp. 97—118. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118. (In Russian).

10. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Никонов Р. А. и др. Дегазация Земли в Арктике: генезис природной и антропогенной эмиссии метана // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 3 (39). — С. 6—22.

Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N. Earth degassing in the Arctic: the genesis of natural and anthropogenic methane emissions. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2020, no. 3 (39), pp. 6—22. DOI:10.25283/2223-4594-2020-3-2-22. (In Russian).

11. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н., Никонов Р. А. Цифровые технологии дистанционного выявления и мониторинга развития бугров пучения и кратеров катастрофических вы-

- бросов газа в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 4 (40). — С. 90—105. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-90-105.
- Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N., Nikonov R. A. Digital technologies for remote detection and monitoring of the development of heaving mounds and craters of catastrophic gas blowouts in the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2020, no. 4 (40), pp. 90—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-90-105. (In Russian).
12. Bogoyavlensky V. Gas Blowouts on the Yamal and Gydan Peninsulas. *GeoExPro* [London], 2015, vol. 12, no. 5. — pp. 74—78.
13. Bogoyavlensky V. I. Innovative Technologies and Results of Studying Processes of Natural and Man-Made Degassing of the Earth in the Lithosphere-Cryosphere-Hydrosphere-Atmosphere System. Third International Conference on Geology of the Caspian Sea and Adjacent Areas (Baku, 2019), 2019. — 5 p. DOI: 10.3997/2214-4609.201952015.
14. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Kishankov A. Complex of Geophysical Studies of the Seyakha Catastrophic Gas Blowout Crater on the Yamal Peninsula, Russian Arctic. *Geosciences*, 2020, 10, 215. — 22 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences10060215>.
15. Bogoyavlensky V. I., Yerokhin G. N., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V., Bryksin V. M. Passive seismic monitoring study of the Earth degassing in the Arctic. *EAGE, Geomodel 2020*, Sep 2020, vol. 2020, pp. 1—5. Available at: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202050102>.
16. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Kargina T., Chuvilin E., Bukhanov B., Umnikov A. New catastrophic gas blowout and giant crater on the Yamal Peninsula in 2020: results of the expedition and data processing. *Geosciences*, 2021, 11, 71. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences11020071>.
17. Dvornikov Y., Leibman M., Khomutov A. et al. Gas-emission craters of the Yamal and Gydan peninsulas: A proposed mechanism for lake genesis and development of permafrost landscapes. *Permafr. Periglac. Process*, 2019, 30, pp. 146—162.
18. Кизяков А. И., Сонюшкин А. В., Лейбман М. О. и др. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на Центральном Ямале // Криосфера Земли. — 2015. — 2. — С. 15—25.
- Kizyakov A. I., Sonyushkin A. V., Leibman M. O. et al. Geomorphological conditions for the formation of a gas outburst funnel and the dynamics of this form in Central Yamal. *Kriosfera Zemli*, 2015, 2, pp. 15—25. (In Russian).
19. Kizyakov A., Khomutov A., Zimin M. et al. Microrelief associated with gas emission craters: Remote-sensing and field-based study. *Remote Sens.*, 2018, 10, p. 677.
20. Kizyakov A., Leibman M., Zimin M. et al. Gas Emission Craters and Mound-Predecessors in the North of West Siberia, Similarities and Differences. *Remote Sens.*, 2020, 12, p. 2182. DOI: 10.3390/rs12142182.
21. Лейбман М. О., Плеханов А. В. Ямальская воронка газового выброса: результаты предварительного обследования // Холодок. — 2014. — № 2 (12). — С. 9—15.
- Leibman M. O., Plekhanov A. V. Yamal gas outlet funnel: results of preliminary examination. *Kholodok*, 2014, no. 2 (12), pp. 9—15. (In Russian).
22. Лейбман М. О., Дворников Ю. А., Стрелецкая И. Д. и др. Связь формирования воронок газового выброса с эмиссией метана на севере Западной Сибири // Актуальные проблемы нефти и газа. — 2018. — Вып. 4 (23). — С. 1—4.
- Leibman M. O., Dvornikov Yu. A., Streletskaya I. D. et al. Relationship between the formation of gas outburst funnels and methane emissions in the north of Western Siberia. *Aktual'nyye problemy nefti i gaza*, 2018, no. 4 (23), pp. 1—4. (In Russian).
23. Оленченко В. В., Синицкий А. И., Антонов Е. Ю. и др. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования «Ямальский кратер» // Криосфера Земли. — 2015. — XIX, 4. — С. 94—106.
- Olenchenko V. V., Sinitsky A. I., Antonov E. Yu. et al. Results of geophysical studies of the territory of the geological formation “Yamal crater”. *Kriosfera Zemli*, 2015, XIX, 4, pp. 94—106. (In Russian).
24. Сизов О. С. Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // Геоматика. — 2015. — № 1. — С. 53—68.
- Sizov O. S. Remote analysis of the surface gas shows consequences in the north of Western Siberia. *Geomatika*, 2015, no. 1, pp. 53—68. (In Russian).
25. Стрелецкая И. Д., Лейбман М. О., Кизяков А. И. и др. Подземные льды и их роль в формировании воронки газового выброса на полуострове Ямал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. — 2017. — Т. 1, № 2. — С. 91—99.
- Streletskaya I. D., Leibman M. O., Kizyakov A. I. et al. Ground ice and its role in the formation of gas-emission crater in the Yamal peninsula. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*, 2017, no. 2, pp. 91—99. (In Russian).
26. Хименков А. Н., Сергеев Д. О., Власов А. Н. и др. Взрывные процессы в области распространения многолетнемерзлых пород — новый вид геокриологической опасности // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2019. — № 6. — С. 30—41.
- Khimenkov A. N., Sergeev D. O., Vlasov A. N. et al. Explosive processes in the permafrost zone as a new type of geocryological hazard. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya*, 2019, no. 6, pp. 30—41. (In Russian).
27. Buldovicz S. N., Khilimonyuk V. Z., Bychkov A. Y. et al. Cryovolcanism on the earth: Origin of a spectacular crater in the Yamal Peninsula (Russia). *Sci. Rep.*, 2018, 8, p. 13534.
28. Chuvilin E., Stanilovskaya J., Titovsky A. et al. A Gas-emission crater in the Erkuta River valley, Yamal Peninsula: characteristics and potential formation model. *Geosciences*, 2020, 10, p. 170.

29. *Chuvilin E., Sokolova N., Davletshina D. et al.* Conceptual models of gas accumulation in the shallow permafrost of Northern West Siberia and conditions for explosive gas emissions. *Geosciences*, 2020, 10, p. 195.
30. *Kotlyakov V. M., Komarova A. I.* Elsevier's dictionary of geography. [S. I.], Elsevier, 2007. 1073 p.
31. *Баду Ю. Б., Трофимов В. Т., Васильчук Ю. К.* Основные закономерности распространения и типы пластовых залежей подземного льда в северной части Западно-Сибирской плиты // Пластовые льды криолитозоны. — Якутск: ИМ СО АН СССР, 1982. — С. 13—24.
- Badu Y. B., Trofimov V. T., Vasilchuk Yu. K.* Main patterns of distribution and types of stratal deposits of underground ice in the northern chatsa of the West Siberian plate. *Plastovyye l'dy kriolitozony*. Yakutsk, IM SO AN SSSR, 1982, pp. 13—24. (In Russian).
32. *Дубиков Г. И., Корейша М. М.* Инъекционные ископаемые льды на полуострове Ямал // Изв. АН СССР. Сер. географ. — 1964. — № 5. — С. 58—65.
- Dubikov G. I., Koreisha M. M.* Injected fossil ice on the Yamal Peninsula. *Izv. AN SSSR, ser. geograf.*, 1964, no. 5, p. 58—65. (In Russian).
33. *Васильчук Ю. К.* Изотопные методы в географии. Ч. 2: Геохимия стабильных изотопов пластовых льдов: В 2 т. — Т. 2. — М.: Изда-во Моск. ун-та, 2014. — 244 с.
- Vasilchuk Yu. K.* Isotope Ratios in the Environment. Pt. 2. Stable isotope geochemistry of massive ice. 2 Vols. Vol. 2 Moscow, Moscow Univ. Press, 2014, 244 p. (In Russian).
34. *Каплянская Ф. А.* Пластовые залежи подземных льдов в ледниковых отложениях на западном побережье п-ова Ямал у пос. Харасавэй // Пластовые льды криолитозоны. — Якутск: ИМ СО АН СССР, 1982. — С. 71—80.
- Kaplyanskaya F. A.* Reservoir deposits of underground ice in glacial deposits on the western coast of the Yamal Peninsula near the village Kharasavey. *Plastovyye l'dy kriolitozony*. Yakutsk, IM SO AN SSSR, 1982, pp. 71—80. (In Russian).
35. *Корейша М. М., Хименков А. Н., Брыксина Г. С.* О происхождении пластовых залежей подземного льда на севере Западной Сибири // Материалы гляциол. исслед. — 1981. — № 41. — С. 62—66.
- Koreisha M. M., Khimenkov A. N., Bryksina G. S.* On the origin of stratal deposits of underground ice in the north of Western Siberia. *Materialy glyatsiol. issled.*, 1981, no. 41, pp. 62—66. (In Russian).
36. *Стрелецкая И. Д., Васильев А. А., Облогов Г. Е. и др.* Метан в подземных льдах и мерзлых отложениях на побережье и шельфе Карского моря // Лед и снег. — 2018. — 58 (1). — С. 65—77.
- Streletskaya I. D., Vasiliev A. A., Oblogov G. E. et al.* Methane in ground ice and frozen sediments in the coastal zone and on the shelf of Kara Sea. *Led i Sneg*, 2018, 58 (1), pp. 65—77. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-1-65-77ea. (In Russian).
37. *Шполянская Н. А., Стрелецкая И. Д.* Генетические типы пластовых льдов и особенности их распространения в Российской Субарктике // Криосфера Земли. — 2004. — Т. 8, № 4. — С. 56—71.
- Shpolyanskaya N. A., Streletskaya I. D.* Genetic types of sheet ice and features of their distribution in the Russian Subarctic. *Kriosfera Zemli*, 2004, vol. 8, no. 4, pp. 56—71. (In Russian).
38. *Harris S. A., French H. M., Heginbottom J. A. et al.* Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms. Technical Memorandum no. 142. National Research Council of Canada 1988. 156 p.
39. *Bogoyavlensky V. I., Budagova T. A., Bezhentsev A. V.* Thermobaric conditions of the Western Arctic oil and gas deposits. *New methods and technology in development and production of oil and gas — onshore and offshore*. Geopetrol-2010, Krakow, 2010, pp. 407—419.
40. *Богоявленский В. И.* Термобарические условия и нефтегазоносность глубокопогруженных отложений Западной Арктики // Устойчивое развитие и международное сотрудничество. — Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2010. — С. 6—8.
- Bogoyavlensky V. I.* Thermobaric conditions and oil and gas content of deeply submerged sediments in the Western Arctic. *Ustoychivoye razvitiye i mezhdunarodnoye sotrudnichestvo*. Apatity, GI KNTs RAN, 2010, pp. 6—8. (In Russian).
41. *Скоробогатов В. А., Строганов Л. В., Копеев В. Д.* Геологическое строение и нефтегазоносность Ямала. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. — 352 с.
- Skorobogatov V. A., Stroganov L. V., Kopeev V. D.* Geological structure and oil and gas potential of Yamal. Moscow, ООО “Nedra-Biznestsentr”, 2003, 352 p. (In Russian).
42. *Брехунцов А. М., Монастырев Б. В., Нестеров И. И., Скоробогатов В. А.* Нефтегазовая геология Западно-Сибирской Арктики. — Тюмень: ООО «МНП «Геодата», 2020. — 464 с.
- Brekhuntsov A. M., Monastirev B. V., Nesterov I. I., Skorobogatov V. A.* Oil and gas geology of the West Siberian Arctic. Tyumen, ООО MNP Geodata, 2020, 464 p. (In Russian).
43. Геологическая карта России и прилегающих акваторий: Масштаб 1:2 500 000. — [Б. м.]: Роснедра, ВСЕГЕИ, ВНИИОкеанология, 2004.
- Geological map of Russia and adjoining water areas. Scale 1:2 500 000. [S. I.], Rosnedra, VSEGEI, VNIIOceanologiya*, 2004. (In Russian).
44. *Дворецкий П. И., Гончаров В. С., Есиков А. Д. и др.* Изотопный состав природных газов севера Западной Сибири: Обзор. — М.: ИПЦ ОАО «Газпром», 2000. — 80 с.
- Dvoretzky P. I., Goncharov V. S., Esikov A. D. et al.* Isotopic composition of natural gases in the north of Western Siberia. *Obzor*. Moscow, IRTs JSC “Gazprom”, 2000, 80 p. (In Russian).
45. *Иванов К. С., Костров Н. П.* О плотности теплового потока, структуре мантии и нефтегазоносности полуострова Ямал (Арктика) // Литосфера. — 2020. — 20 (6). — С. 851—862.
- Ivanov K. S., Kostrov N. P.* Heat flux density, mantle structure and oil and gas potential of the Yamal Pen-

- insula (Arctic). *Litosfera*, 2020, 20 (6), pp. 851—862. (In Russian).
46. Хуторской М. Д., Антоновская Г. Н., Басапкина И. М. и др. Сейсмичность, тепловой поток и тектоника Западно-Арктического бассейна // Мониторинг. Наука и технологии. — 2015. — № 3 (24). — С. 23—32.
- Khutorskoy M. D., Antonovskaya G. N., Basapkina I. M. et al.* Seismicity, heat flow and tectonics of the West Arctic basin. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*, 2015, no. 3 (24), pp. 23—32. (In Russian).
47. Дучков А. Д., Соколова Л. С. Тепловой поток Сибири. — Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014. — С. 211—216.
- Duchkov A. D., Sokolova L. S.* Heat flow of Siberia. *Novosibirsk, Izd-vo INGG SO RAN*, 2014, pp. 211—216. (In Russian).
48. Исаев В. И., Лобова Г. А., Фомин А. Н. и др. Тепловой поток и нефтегазоносность (полуостров Ямал, Томская область) // Георесурсы. — 2019. — 21 (3). — С. 125—135.
- Isaev V. I., Lobova G. A., Fomin A. N. et al.* Heat flow and oil and gas content (Yamal peninsula, Tomsk region). *Georesursy*, 2019, 21 (3), pp. 125—135. (In Russian).
49. Romanovsky V. E., Smith S. H., Christiansen H. H. Permafrost Thermal State in the Polar Northern Hemisphere during the International Polar Year 2007—2009: a Synthesis. *Permafrost and Periglac. Process*, 2010, 21, pp. 106—116. DOI: 10.1002/ppp.689.
50. Истомин В. А., Чувилин Е. М., Сергеева Д. В. и др. Влияние компонентного состава и давления газа на льдо- и гидратообразование в газонасыщенных поровых растворах // НефтеГазХимия. — 2018. — № 2. — С. 33—42.
- Istomin V. A., Chuvilin E. M., Sergeeva D. V. et al.* Influence of gas composition and pressure on ice and hydrate formation in gas-saturated pore solutions. *Neftegazokhimiya*, 2018, no. 2, pp. 33—42. (In Russian).
51. Wagner W., Saul A., Pru A. International equations for the pressure along the melting curve and the sublimation curve of ordinary water substance. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1994, no. 23, pp. 515—527.
52. Мельников В. П., Нестеров А. Н., Поденко Л. С., Решетников А. М. Влияние диоксида углерода на плавление подземного льда // Докл. Акад. наук. — 2014. — Т. 459, № 1. — С. 1353—1355.
- Melnikov V. P., Nesterov A. N., Podenko L. S., Reshetnikov A. M.* Influence of carbon dioxide on the melting of underground ice. *Reports of the Academy of Sciences*, 2014, vol. 459, no. 1, pp. 1353—1355. (In Russian).
53. Sloan E. D., Koh C. A. *Clathrate Hydrate of Natural Gases*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008, 721 p. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781420008494>.
54. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИгаз, 2009. — 192 с.
- Yakushev V. S.* Natural gas and gas hydrates in the cryolithozone. *Moscow, VNIIGaz*, 2009, 192 p. (In Russian).
55. Арэ Ф. Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли. — 1998. — Т. 2, № 4. — С. 42—50.
- Are F. E.* The problem of emission of deep gases into the atmosphere. *Kriosfera Zemli*, 1998, vol. 2, no. 4, p. 42—50. (In Russian).
56. Дучков А. Д., Лысак С. В., Голубев В. А. и др. Тепловой поток и геотермальное поле Байкальского региона // Геология и геофизика. — 1999. — Т. 40, № 3. — С. 287—303.
- Duchkov A. D., Lysak S. V., Golubev V. A. et al.* Heat flow and geothermal field of the Baikal region. *Geologiya i geofizika*, 1999, vol. 40, no. 3, pp. 287—303. (In Russian).
57. Котляков В. М., Алексеев В. Р., Волков Н. В. и др. Гляциологический словарь / Под ред. В. М. Котлякова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 528 с.
- Kotlyakov V. M., Alekseyev V. R., Volkov N. V. et al.* *Gla-ciological Dictionary*. Ed. by V. M. Kotlyakov. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1984, 528 p. (In Russian).
58. Белова Н. Г. Пластовые льды юго-западного побережья Карского моря. — М.: МАКС Пресс, 2014. — 180 с.
- Belova N. G.* Sheet ice on the southwestern coast of the Kara Sea. *Moscow, MAKS Press*, 2014, 180 p. (In Russian).
59. Mackay J. R. Gas-domed mounds in permafrost, Kendall Island, N.W.T. *Geographical Bull.*, 1965, vol. 7, no. 2, pp. 105—115.
60. Zimbelman D. R., Rye R. O., Landis G. P. Fumaroles in ice caves on the summit of Mount Rainier — Preliminary stable isotope, gas, and geochemical studies. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 97 (1—4), pp. 457—473.
61. Curtis A., Kyle P. Geothermal point sources identified in a fumarolic ice cave on Erebus volcano, Antarctica using fiber optic distributed temperature sensing. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38 (16), p. L16802. DOI: 10.1029/2011GL048272.
62. Why are geothermal ice caves more dangerous than caves created by meltwater? *Iceland Magazine*, 2018, March 26. Available at: <https://icelandmag.is/article/why-are-geothermal-ice-caves-more-dangerous-caves-created-meltwater>.
63. Вулкан Мутновский на Камчатке: лед и пламя внутри кратера. URL: <https://kamchatkaland.ru/note/vulkan-mutnovskij>.
- Mutnovsky volcano in Kamchatka: ice and flame inside the crater.* Available at: <https://kamchatkaland.ru/note/vulkan-mutnovskij>. (In Russian).
64. Pelto M. Paradise Glacier Ice Caves Lost. 2010. Available at: <https://glacierchange.wordpress.com/2010/04/29/paradise-glacier-ice-caves-lost/>.
65. Оленченко В. В., Гагарин Л. А., Христоворов И. И. и др. Строение участка развития термосуффузионных процессов в пределах Бестеяхской террасы реки Лены по геофизическим данным // Криосфера Земли. — 2017. — Т. 21, № 5. — С. 16—26.
- Olenchenko V. V., Gagarin L. A., Khristovorov I. I. et al.* The structure of the site for the development of thermal diffusion processes within the Besteyakhskaya terrace of the Lena River according to geophysical data. *Kriosfera Zemli*, 2017, vol. XXI, no. 5, pp. 16—26. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-5(16-26). (In Russian).

Информация об авторе

Богоявленский Василий Игоревич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией «Шельф», главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: vib@pgc.su.

Библиографическое описание данной статьи

Богоявленский В. И. Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 51—66. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-51-66.

FUNDAMENTAL ASPECTS OF THE CATASTROPHIC GAS BLOWOUT GENESIS AND THE FORMATION OF GIANT CRATERS IN THE ARCTIC

Bogoyavlensky V. I.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on December 1, 2020

Abstract

The article considers the fundamental aspects of powerful explosive degassing of the Earth in the north of Western Siberia (mainly Yamal). The author presents the results of a comprehensive analysis and compilation of a large volume of factual materials obtained during field studies of a number of catastrophic gas blowout objects in 2014—2020. The author outlines that most of the craters found in Yamal are confined to the zone of anomalous heat flow in the area of the Bovanenkovskoye field. The researcher substantiates the process formation model of gas-saturated cavities in the massifs of ground ice, heaving mounds, blowouts and self-ignition of gas with the formation of giant craters and formulates the main features of powerful explosive degassing in the Arctic.

Keywords: *Arctic, Yamal, Bovanenkovskoye field, cryolithosphere, thermokarst, geothermy, heat flow, ice melting, gas-saturated cavities, gas hydrates, abnormally high reservoir pressures (AHRP), Earth remote sensing (ERS).*

The research was conducted according to the state assignment on the topic “Rational nature management and effective development of oil and gas resources of the Arctic and Sub-Arctic zones of the Earth” (No. AAAA-A19-119021590079-6).

The author is grateful: to the Russian Academy of Sciences and the Government of the Yamalo-Nenets Autonomous District for continuous support of scientific research in the Arctic; to PJSC NOVATEK and OJSC Yamal LNG for their extensive and repeated assistance in organizing fields studies; to PJSC Gazprom for assistance in scientific research.

Information about the author

Bogoyavlensky Vasily Igorevich, Doctor of Engineering Science, Corresponding member of RAS, Deputy Director for Science, Head of “Shelf” Laboratory, Chief Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: vib@pgc.su.

Bibliographic description

Bogoyavlensky V. I. Fundamental aspects of the catastrophic gas blowout genesis and the formation of giant craters in the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 1, pp. 51—66. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-51-66. (In Russian).

© Bogoyavlensky V. I., 2021