

УДК 551.215.4, 551.311.8:553.981

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ГРЯЗЕВОМ ВУЛКАНИЗМЕ В АРКТИКЕ НА ПОЛУОСТРОВЕ ЯМАЛ

© 2023 г. Член-корреспондент РАН В. И. Богоявленский^{1,*}

Поступило 19.05.2023 г.

После доработки 22.05.2023 г.

Принято к публикации 23.05.2023 г.

В 2014–2022 гг. на арктическом полуострове Ямал выполнен большой объем экспедиционных работ с широким комплексом геолого-геофизических методов, результаты которых проанализированы в совокупности с данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. Получена принципиально новая информация о газодинамических механизмах опасных процессов в криолитозоне, включая катастрофические выбросы и взрывы газа с образованием гигантских кратеров. Обнаружено свыше 3 тысяч зон мощных выбросов газа с формированием кратеров на дне термокарстовых озер, рек и прибрежной части Карского моря. В 2022–2023 гг. по данным ДЗЗ на Ямале впервые обнаружены крупные грязевулканические постройки, расположенные на дне термокарстовых озер Лабварто и Ямбуто. Мониторинг их состояния по ретроспективным космоснимкам показал наличие периодических выбросов подземных флюидов, включая газ. Сделан вывод об открытии на Ямале активных грязевых вулканов.

Ключевые слова: Арктика, полуостров Ямал, дегазация Земли, термокарстовые озера, выбросы и взрывы газа, грязевые вулканы, сипы газа, газогидраты, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ)

DOI: 10.31857/S2686739723601084, **EDN:** IRDDL

ВВЕДЕНИЕ

Одной из распространенных форм дегазации Земли являются грязевые вулканы (ГВ), которые, согласно ГОСТ Р 57123-2016 [1], представляют собой “геологические образования, постоянно или периодически извергающие грязевые массы и газы... В местах ранее существовавших разломов могут быть грязевые вулканы”. Судя по публикациям, более столетия назад основные положения науки о грязевом вулканизме уже соответствовали современному, и ведущие ученые признавали прямое влияние газа на механизм грязевого вулканизма: академик В.И. Вернадский отмечал, что “газы составляют самую характерную активную силу вулкана, обуславливающую все его морфологические проявления... Тип периодически повторяющихся газовых струй представляют грязевые сопки. Грязевые сопки дают струи временами; обычно они связаны с выделениями газовых источников. Таким образом, хотя медленно, газ всегда в них выделяется. Количество газовых сопкок не подвергалось исчислению” ([2], с. 146 и 147).

В глобальном обобщении азербайджанских ученых [3] в 2015 г. приведена информация о 2505 ГВ, большей частью расположенных на дне Мирового океана (1401 или 55.9%). Мощные выбросы газа из ГВ часто самовоспламеняются и взрываются. Высота горящих факелов ГВ может достигать нескольких сотен метров, упоминается более 500 м [3, 4], а в 1940 г. на грязевулканическом острове Харе-Зирия (Булла) — даже 1200 м ([4], с. 18). По нашему мнению, подтвержденному рядом имеющихся фактов, самовоспламенения и взрывы газа при извержениях ГВ могут происходить за счет возникающей электризации пространства и электростатических разрядов [5, 6, 12].

Наличие ГВ является одним из поисковых признаков на нефть и газ, при этом ГВ предоставляют значимую информацию о литологии осадочной толщи, охваченной грязевулканическим процессом [3–6]. Геопространственные данные о ГВ накапливаются в ИПНГ РАН в геоинформационной системе “Арктика и Мировой океан” (ГИС “АМО”) наряду с другими данными, формирующими базу “Big Data” [5, 6].

Практически ежегодно появляется информация о новых открытиях ГВ, при этом их признание одними геологами нередко оспаривается другими. Например, ГВ Naakon Mosby, обнаруженный в Норвежском море в 1995 г. на глубине

¹Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: geo.ecology17@gmail.com

около 1250 м, признается ГВ в абсолютном большинстве публикаций, включая широкоизвестные обобщения [7, 8]. Однако в работе ([3], с. 11) это признание считается дискуссионным. Здесь будет уместно отметить открытие 7 мая 2023 г. к северу от ГВ Naakon Mosby на глубине дна около 400 м второго ГВ, названного Borealis.

Изученность проявлений грязевого вулканизма в Циркумарктическом регионе находится на начальной стадии: в большинстве обобщающих публикаций говорится лишь об одном-трех ГВ [3, 7, 8]. Традиционная сложившаяся привязка основных известных грязевулканических провинций к зонам распространения альпийского тектоногенеза снижает интерес исследователей ГВ к Циркумарктическому региону. Вместе с тем в данном регионе существуют осадочные бассейны с мощными комплексами терригенных мел-кайнозойских отложений, в которых вполне могли сформироваться ГВ.

В итоге проведения детальных исследований ряда пингоподобных поднятий (PLF — pingo-like features) геологическими службами Канады и США (GSC и USGS) в море Бофорта более 10 PLF было признано ГВ [9, 10]. Анализ доступных материалов позволяет утверждать о несравнимо большем количестве ГВ на дне моря Бофорта в районе открытия многих сотен еще недостаточно изученных PLF. Вместе с тем в связи с широким распространением на суше Канады и Аляски классических пинго (булгуняхи-гидролакколиты) [11], видимо, на мелководном шельфе (примерно до глубин 120 м) многие PLF будут отнесены к типу классических пинго, основным признаком которых является наличие ледяного ядра. Также отметим, что часть PLF может иметь газогидратный генезис [9].

Исследование разнообразных проявлений дегазации Земли, особенно с учетом криогенной специфики Арктики, является важным направлением геологической науки, актуальность которого значительно выросла в связи с глобальными климатическими изменениями.

В ИПНГ РАН со времени его основания в 1987 г. значительное внимание уделяется изучению процессов и форм проявлений дегазации Земли, оказывающих большое влияние на многие другие геологические явления, включая формирование и расформирование залежей углеводородов. Среди них особую значимость имеют невидимые на поверхности земли глубинные и приповерхностные процессы, лишь часть которых отображается на поверхности, включая дно Мирового океана, в виде сипов (seeps — просачивания) подземных флюидов, в том числе смеси углеводородных газов, а также мощных выбросов газа (взрывная дегазация) с образованием гигантских кратеров [5, 6, 12–16].

В 2014–2022 гг. на севере Западной Сибири (полуострова Ямал, Гыданский и Тазовский) проведен большой объем исследований различных объектов дегазации, включая около 20 обнаруженных гигантских кратеров в многолетнемерзлых породах (ММП). Показано, что кратеры образовались после газодинамических взрывов многолетних бугров пучения (МБП) за счет не просто аномально высоких пластовых давлений (АВПД), а сверхвысоких давлений (СВД [17]) газа, многократно превышающих литостатическое давление [5, 6, 12–16]. По данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и в ходе экспедиционных исследований обнаружено, что некоторые из объектов (СЗ, С11 в ГИС “АМО” и озеро Открытие [5, 12–15]) имеют признаки грязевого вулканизма согласно [1].

Необходимо отметить, что А.А. Нежданов и соавт. [18] на основе обнаружения на Песцовом и Самбургском месторождениях (Тазовском полуострове) на нескольких МБП (булгуняхи-гироллакколиты) “многочисленных следов излияния грязи в виде мелких холмиков”, а также “сальз — участков высачивания грязи без образования холма” пришли к выводу, что все подобные поднятия могут быть отнесены к ГВ. С возможными проявлениями грязевого вулканизма столкнулся В.А. Епифанов во время обследования поднятий вблизи Дерябинского кратера С4 на Гыданском полуострове [19]. Не вдаваясь в длительное обсуждение вышесказанного, отметим наше согласие с возможным широким распространением грязевого вулканизма на севере Западной Сибири и отметим необходимость его целенаправленного изучения.

Грязевой вулканизм представляет несомненные значительные угрозы жизнедеятельности человека, включая освоение ресурсов полезных ископаемых [5, 6, 21]. Основной целью данной работы является выявление новых опасных объектов дегазации Земли грязевулканического генезиса в Российской Арктике. При этом приоритетным районом выбран полуостров Ямал, на котором ведется добыча углеводородов на трех месторождениях: Новопортовском и Бованенковском с 2012 г., Южно-Тамбейском с 7 декабря 2017 г.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Начиная с 2014 г. ИПНГ РАН провел на полуострове Ямал большой объем экспедиционных работ с широким арсеналом геолого-геофизических методов изучения нового опасного явления, связанного с процессами мощных выбросов, самовоспламенений и взрывов газа на суше, а также со дна термокарстовых озер, рек и прибрежных зон Карского моря [5, 6, 12–16]. Термокарстовые озера Ямала очень мало изучены, лишь на неко-

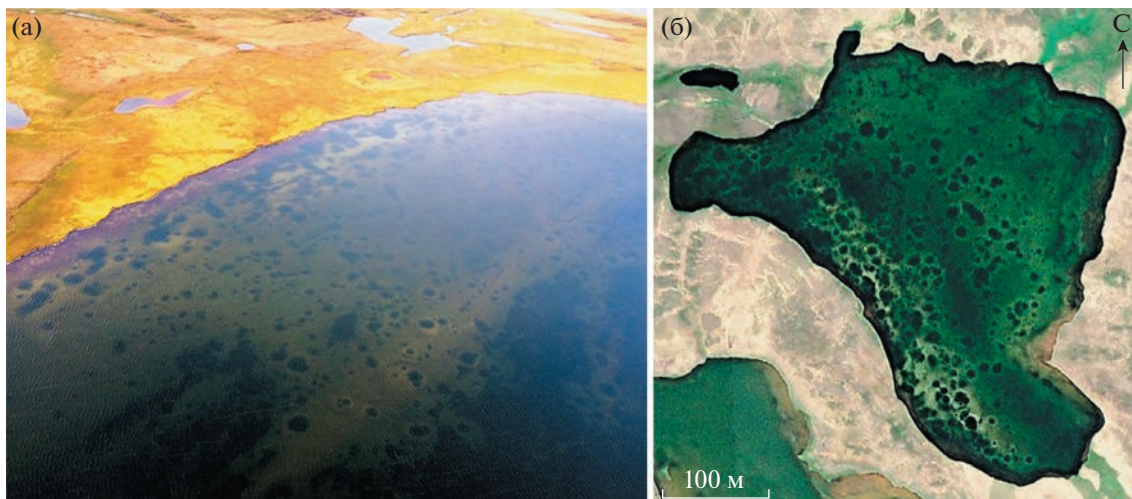


Рис. 1. Термокарстовые озера с кратерами выбросов газа на дне: а — фотография из вертолета (В. Богоявленский, 17 августа 2015 г.), б — космоснимок WorldView-2 20 июля 2022 г. (ESRI).

торых из них проводились эхолокационные батиметрические исследования, включая работы МГУ на наиболее крупных озерах [20], а также ИПНГ РАН на ряде озер с интенсивной эмиссией газа [5, 13–15].

Особо важные результаты получены с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [5, 6, 15, 16], позволивших получить принципиально новую трех- и четырехмерную (3D–4D) информацию в ГИС “АМО”, созданной и постоянно развиваемой на основе программного обеспечения ArcGIS (ESRI, США).

При комплексном анализе разнообразных материалов на севере Западной Сибири особенно важную информацию предоставляют данные ДЗЗ из космоса сверхвысокого, высокого и среднего пространственного разрешения в широком частотном диапазоне. Ретроспективный анализ особенностей формирования изучаемых объектов и чрезвычайных событий от начала 1960-х годов до настоящего времени кардинально расширяет спектр геопространственных данных [5, 12, 14–16].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 2014–2023 гг. на полуострове Ямал по данным ДЗЗ сверхвысокого разрешения в оптическом диапазоне частот обнаружено более трех тысяч зон выбросов газа со дна мелководных частей прибрежных зон Карского моря, рек и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа (ТОКВГ) (рис. 1) [5, 12–15]. Подводные кратеры выбросов газа также широко распространены на дне Мирового океана, при этом их называют покмарками (rockmarks), признанными индикаторами наличия субвертикальных разломов [8, 10, 13, 14, 21].

Под крупными незамерзающими полностью (до дна) озерами существуют сквозные или несквозные талики [5, 9, 12, 14], которые являются потенциальными каналами для дегазации осадочных отложений, в том числе из газонасыщенных резервуаров в ММП с залежами газа в свободном и/или гидратном состоянии. На дне водоемов Ямала диаметры кратеров обычно меняются от долей метра до 10–20 м, но в отдельных случаях достигают 40–50 м. Вокруг недавно образовавшихся кратеров наблюдаются небольшие аккумулятивные поднятия (брустверы), формирующиеся выброшенными газом придонными отложениями. На многих ТОКВГ количество кратеров измеряется многими сотнями (см. рис. 1). Разновременные космоснимки свидетельствуют, что в течение нескольких лет рыхлые аккумулятивные отложения брустеров размываются и сползают внутрь, при этом латеральные размеры кратеров увеличиваются, а глубина уменьшается.

Особый интерес представляет то, что на дне ряда термокарстовых озер по данным ДЗЗ сверхвысокого разрешения обнаружены не только упомянутые выше отрицательные формы рельефа (покмарки), но и крупные возвышенности конической формы, идентифицированные нами как грязевулканические постройки. В частности, такие объекты найдены на дне ямалских озер Лабварто и Ямбуто (в переводе М.Н. Окоетто с ненецкого языка Лабвар-То — озеро Обвалившихся берегов, а Ямбу-То — Длинное озеро).

На рис. 2 А приведен летний космоснимок WorldView-2 сверхвысокого пространственного разрешения (0.3–0.5 м) крупного (1550 × 2140 м) ТОКВГ Лабварто (69.985° с.ш., 71.9354° в.д.), расположенного в центральной части полуострова Ямал в 3.7 км к юго-западу от кратеров озера От-

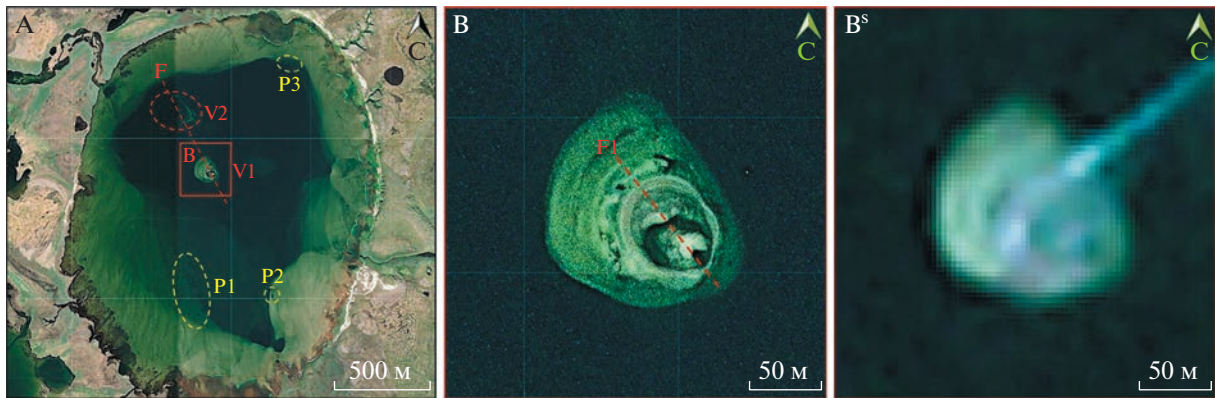


Рис. 2. Космоснимок WorldView-2 термокарстового озера Лабварто (А) и его увеличенный фрагмент (В) с дополнением фрагмента космоснимка Sentinel-2 (B^S). Обозначения: P1, P2 и P3 — покмарки; V1 и V2 — грязевые вулканы; F и F1 — прогнозируемые разломы.

крытие. На его мелководном дне сквозь прозрачную воду хорошо видны три зоны существования покмарок (см. рис. 2 А — P1, P2 и P3) и два объекта (V1 и V2), отождествляемые нами с грязевулканическими постройками. Западная сторона поднятия V2, видимо, находится в полуразрушенном (размытом) состоянии, поэтому подробно рассмотрено только поднятие V1. Отметим, что соединяющая центры этих поднятий линия (вероятное разрывное нарушение — разлом F) имеет северо-западную ориентацию по азимуту около 333° .

Основаниями для отнесения объекта V1 к грязевулканическим постройкам являются его характерная коническая слегка асимметричная форма и наличие кратера/кальдеры с эруптивными каналами (жерлами), хорошо видимыми на увеличенном фрагменте (рис. 2 В). Вершина поднятия V1 имеет размеры 70×80 м, а видимая сквозь воду нижняя часть — 130×150 м, при этом реальные размеры основания этого поднятия существенно больше, так как дно не видно. На поверхности поднятия V1 хорошо выделяются неоднородности, напоминающие аккумулятивные и оползневые формы. Также в верхней части наблюдаются возможные дополнительные боковые каналы (грифоны), которые нередко формируются на боковых стенках грязевулканических построек [3, 7].

Кальдера на объекте V1 имеет эллиптическую форму с ориентацией большой оси F1 в северо-западном направлении по азимуту 323° . Отметим, что средний азимут между азимутами прогнозируемых разломов F и F1 равен 328° , а различие азимуты F и F1 от среднего — всего 5° . Соотношения осей эллипса составляет 1:1.33 (коэффициент сжатия эллипса $K_{\text{сж}} = 0.75$).

С учетом того, что толщина озерного льда в этих широтах может достигать 1.5–2.0 м, считаем, что глубина вершины вулкана близка к этим величинам. За счет новых извержений грязебрек-

чий вершина вулкана может периодически подниматься выше уровня воды, но ее формирование ограничивается размыванием и ежегодным срезованием движущимся по ветру тающим льдом.

В результате комплексного анализа серии доступных космоснимков Sentinel-2 L1C Европейского космического агентства ESA высокого разрешения (10 м) в течение семи лет 2016–2022 гг. обнаружены прямые признаки эмиссии флюидов из вершин ГВ V1 и V2. Во время весеннего таяния льда (май–июнь) наблюдаются обособленные ранние проталины во льду. Обычно они возникают в зонах уменьшения толщины льда благодаря включениям пузырей газа и/или периодического возникновения пробоев льда при мощных выбросах газа [13]. Такие эффекты постоянно наблюдаются на космоснимках практически над всеми известными нам природными и техногенными зонами эмиссии газа со дна озер, включая озеро Открытие [5, 13, 14] и техногенный водоем в районе Кумжинской катастрофы [5]. По данным Sentinel-2 L1C на озере Лабварто в 2021 г. проталины фиксировались с 30 мая по 19 июня, а в 2022 г. — с 19 мая по 9 июня. Проталина над вершиной V1 во всех случаях была существенно крупнее, чем над V2.

В летний безледный период (июнь–октябрь) 2015–2022 гг. на космоснимках Sentinel-2 L1C на озере Лабварто ежегодно наблюдались относительно короткие (от 80 до 500 м) шлейфы флюидопотоков белесого цвета, выходящих из вершин V1 и V2 и распространяющихся по направлению перемещения приповерхностного слоя воды ветром. Для иллюстрации на рис. 2 B^S показан флюидопоток из вершины V1 6 августа 2016 г. В оптическом диапазоне космоснимков белесый цвет воды возникает за счет увеличения альбедо при наличии пузырей газа (струй газа) [15], выхода пластовых вод с растворенным газом, выделяю-

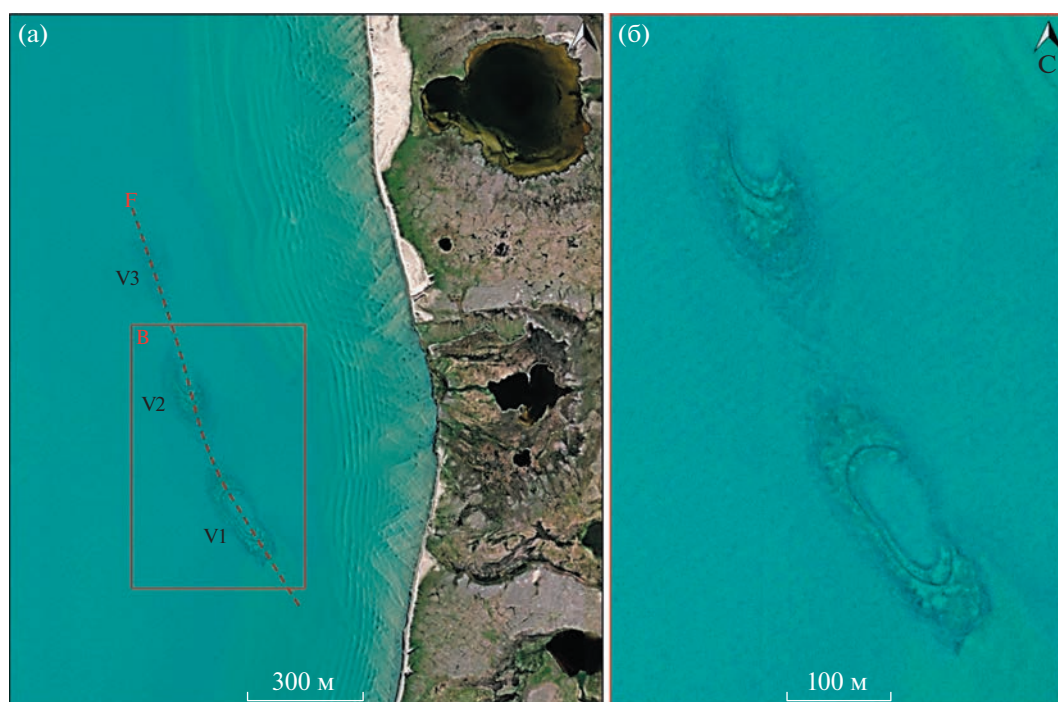


Рис. 3. Космоснимок участка термокарстового озера Ямбуто (а) с его увеличенным фрагментом (б). Обозначения: V1, V2 и V3 — грязевые вулканы; F — прогнозируемое положение разлома.

щимся в виде пузырей за счет снижения давления (декомпрессия), и/или светлыми мутявыми (грязевыми) потоками. В 2021 г. белесые флюидопотоки были зафиксированы 6, 23, 24 июля и 19, 27 сентября, а в 2022 г. — 7, 8, 20 августа и 12 сентября.

Термокарстовое озеро Ямбуто расположено в центральной части Ямала рядом с тремя большими Нейтинскими озерами. Ямбуто является третьим по площади водной поверхности (169 км^2), но самым длинным (22 км) и водоемким (около 2.35 км^3) [18]. При средней глубине около 14 м оно считается самым глубоким за счет наличия в северной части локальных впадин с глубинами до 59 и 63.7 м (возможные кратеры выбросов газа). Из-за редкой рекогносцировочной сети эхолокационных профилей [18] не вызывает сомнений возможное существование на дне Ямбуто пропущенных локальных объектов, как впадин, так и поднятий.

В северо-восточной части озера Ямбуто на основе космоснимков сверхвысокого и высокого разрешений обнаружены три крупных объекта (70.0762° с.ш., 70.9856° в.д.), имеющие вид возвышенностей (рис. 3) с латеральными размерами видимых продолговатых (эллиптических) оснований $90 \times 315 \text{ м}$ (V1), $90 \times 270 \text{ м}$ (V2) и $50 \times 210 \text{ м}$ (V3). При этом соотношения осей эллипсов составляют: 1:3.5; 1:3.0 и 1:4.2 ($K_{сэ}$: 0.29; 0.33 и 0.24). Из-за невидимости дна можно предполо-

жить, что реальные размеры наблюдаемых поднятий несколько больше. Отметим, что эти объекты вытянуты вдоль слегка искривленной линии (F), которая, видимо, отображает линию пересечения дна глубинным разломом северо-западной ориентации по азимутам от 328° (около V1) до 342° (около V2 и V3), в среднем — 335° . Это близко к значению азимута прогнозируемого разлома на озере Лабварто (333°).

На поднятиях V1 и V2 хорошо видны многие специфические элементы их строения (рис. 3 б). Среди них особо выделим впадины-кратеры (кальдеры) в центральных частях эллиптической формы с внутренними размерами $45 \times 120 \text{ м}$ (V1) и $30 \times 65 \text{ м}$ (V2), для которых соотношения осей составляют 1:2.7 и 1:2.2, а $K_{сэ}$ — 0.37 и 0.45. На краях и стенках возвышенностей V1 и V2 имеются признаки наличия слоистых отложений, а также видны оползневые и кусковые (бугристые) отложения.

Вершина объекта V3 находится глубже V1 и V2, за счет чего особенности строения его поверхности не видны, а сам он был выделен лишь как прогнозный объект на основе общих закономерностей расположения с хорошо видимыми двумя соседними объектами.

Анализ космоснимков Sentinel-2 L1C и Landsat 2016–2022 гг. показал на озере Ямбуто периодические извержения из кальдер V1 и V2 протяженных мутявых потоков (преимущественно из

V1), распространяющихся в основном в южном направлении по направлению течения и/или ветра. Активность извержений на Ямбута значительно ниже, чем на Лабварто. Наиболее уверенно мутевые потоки на Ямбута зафиксированы: в 2016 г. — 12 августа, 1, 5 и 24 октября; в 2017 г. — 9 и 10 июля; в 2019 г. — 10 и 11 сентября; в 2020 г. — 19 июля; в 2022 г. — 12 сентября. Около юго-восточной части основания V1 наблюдается более мелководная часть дна, образовавшаяся за счет периодического отложения предположительно суглинистого материала, выносимого из его жерла.

По данным ДЗЗ в процессе таяния льда крупные (свыше 20 м) проталины не обнаружены, что, видимо, свидетельствует о меньшей газовой активности объектов V1 и V2 по сравнению с объектами на озере Лабварто.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Происходящая деградация ММП с возможной диссоциацией газогидратов, а также миграция газа из широко распространенных залежей и сильно газонасыщенных пластовых вод, снижает упруго-прочностные свойства грунтов на дне озер, способствует разжижению глин и возможным процессам грязевого вулканизма. На полуострове Ямал имеются все основные факторы, сопутствующие образованию ГВ в Азербайджане: “пластичные глинистые толщи, пластовые воды, скопления углеводородных газов, тектонические разломы и ... АВПД” ([3], с. 26).

В озере Ямбута по сравнению с соседними Нейтинскими озерами в 2.3–2.5 раза выше содержание жидких углеводородов и примерно в 1.7–3.8 раза выше электропроводность [18]. Эти явления могут быть объяснены повышенным притоком подземных флюидов, включая соленые воды (криопэги).

Обращает на себя внимание сильная вытянутость (эллиптичность) оснований и кальдеровидных кратеров грязевулканических построек озера Ямбута: соотношения осей эллипсов меняется от 1:2.2 до 1:4.2 ($K_{\text{сэ}}$ — от 0.45 до 0.23). Отметим, что вытянутая (эллиптическая) форма основания, кальдеры и/или жерла известных ГВ мира не является редкостью, а указывает на приуроченность к дизъюнктивным (разрывным) нарушениям (разломам и/или трещинам) [3, 7]. В частности, в Азербайджане известны вытянутые вдоль разлома ГВ Торагай, Галмаз, Бахар Малый (Toragay, Galmaz, Bala Bakhar) и др., а также вулканические острова Харе-Зира, Гарасу и Зенбил (Khare-Zira, Garasu, Zenbil) [3]. Вытянутые формы имеют некоторые ГВ на дне Черного моря (Водяницкого, Эколог, Манганари) и моря Бофорта (Кораноар) [3]. По данным сейсморазведки поперечные сече-

ния эруптивного канала также “являются эллипсами неправильной формы” ([4], с. 51).

Известно, что ГВ часто встречаются группами, при этом они обычно формируют вытянутые вдоль разломов цепочки [3, 7, 17, 21]. На озерах Лабварто и Ямбута обнаружены, соответственно, 2 и 3 вулканоподобных поднятия, а соединяющие их линии имеют северо-западную ориентацию (средние азимуты 333° и 335°), что является характерным направлением для региональных разломов Ямала [16]. Отметим, что ориентация обособленного от Западно-Сибирской рифтовой системы Ямальского рифта ([13], с. 60) имеет по разным данным азимут $318\text{--}330^\circ$.

В 2019 г. на озере Открытие, расположенном в 40 км к юго-востоку от вулканоподобных построек озера Ямбута, по данным ДЗЗ по соединяющей четыре крупных подводных кратера линии был спрогнозирован разлом по азимуту 345° [13]. По данным сейсморазведки 4D азимут простираения выделенного глубинного разлома, прослеженного до основного газоносного горизонта сеномана, составил 325° . Отметим, что среднее значение между этими двумя азимутами составило 335° — точно как на Ямбута и лишь на 2° больше, чем на Лабварто!

В конце весны 2020 г. на Бованенковском нефтегазоконденсатном месторождении под газодинамическим воздействием произошел взрыв МБП С17 с мощным выбросом газа [6, 12, 16], в результате которого обнажилась гигантская полость в массиве подземного льда. Ее основание имело эллиптическую форму с ориентацией большей оси в северо-западном направлении по азимуту 350° (близко к описанным выше объектам). Соотношение длин осей эллипса — 1:4.4 ($K_{\text{сэ}}$ — 0.228), что сопоставимо с характеристиками V1 на озере Ямбута. Главными объяснениями таких выраженных эллиптических форм С17 и V1 является приуроченность к дизъюнктивным нарушениям.

По своему генезису выявленные на термокарстовых озерах Лабварто и Ямбута поднятия никак не могут быть отнесены к МБП криогенного типа (булгуняхи-пинго), имеющим ледяное ядро. Они существуют в круглогодично незамерзающей водной среде на дне крупных термокарстовых озер с вероятнее всего сквозными таликами. Эти объекты имеют все признаки ГВ, и мы не видим никакой другой модели, которая могла бы так же им соответствовать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее десятилетие на полуострове Ямал ИПНГ РАН выполнен большой объем экспедиционных работ с широким комплексом геолого-геофизических методов, позволивших в совокупности с данными ДЗЗ из космоса получить прин-

ципально новую информацию о газодинамических механизмах опасных процессов в криолитозоне, включая катастрофические выбросы и взрывы газа с образованием многочисленных гигантских кратеров на суше и дне термокарстовых озер. При этом на Ямале на дне термокарстовых озер, рек и прибрежных зон Карского моря обнаружено свыше 3 тысяч зон мощных выбросов газа с формированием кратеров. Имеются основания считать, что такие выбросы газа преимущественно происходят из неглубоко залегающих залежей со сверхвысоким (сверхлитостатическим) давлением [5, 12, 17]. Газ может накапливаться за счет глубинных и мелкозалегающих источников, включая диссоциацию газогидратов.

По данным ДЗЗ на Ямале на дне термокарстовых озер Лабварто и Ямбуто впервые обнаружены крупные грязевулканические постройки. При этом мониторинг обстановки по ретроспективным космоснимкам показал наличие периодических выбросов из вершин этих объектов подземных флюидов, включая газ. По совокупности ряда признаков обнаруженные объекты с высоким уровнем вероятности могут быть отнесены к активным грязевым вулканам. Ранее во всем Циркумарктическом регионе столь явные грязевулканические постройки на дне термокарстовых озер были неизвестны. Также отметим, что нами обнаружено еще несколько озер с подобными объектами.

Результаты исследований грязевулканических построек на дне термокарстовых озер полуострова Ямал с учетом ряда ранее открытых грязевых вулканов на суше Аляски, Гренландии и Исландии, а также на дне морей Бофорта, Норвежском и Карском [3, 9, 10, 22], позволяют утверждать о широком распространении грязевого вулканизма в Циркумарктическом мегарегионе.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме “Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата” (122022800264-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 57123-2016 (ИСО 19901-2: 2004). Нефтяная и газовая промышленность Сооружения нефтегазопромысловые морские. Проектирование с учетом сейсмических условий. М.: Стандартинформ, 2016. 32 с.
2. Вернадский В.И. О газовом обмене земной коры. Известия Императорской академии наук, Серия 6. 1912; 6 (2): 141–162.

3. Алиев Ад.А., Гулиев И.С., Дадашев Ф.Г., Рахманов Р.Р. Атлас грязевых вулканов мира. Изд. “Nafta-Press”, 2015. 323 с.
4. Юсубов Н.П., Гулиев И.С. Грязевой вулканизм и углеводородные системы Южно-Каспийской впадины (по новейшим данным геофизических и геохимических исследований). Баку, “Элм”, 2022. 168 с.
5. Богоявленский В.И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Горная промышленность. 2020. 1 (149). С. 97–118.
6. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В. Специфика грязевулканической дегазации Земли с катастрофическими последствиями. // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 12. С. 20–28. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-12-20-28>
7. Kopf A.J. Significance of mud volcanism // Reviews of Geophysics. 2002. 40. 02. 1005. 52 p. <https://doi.org/10.1029/2000RG000093>
8. Judd A., Hovland M. Seabed fluid flow – impact on geology, biology and the marine environment. Cambridge University Press. Cambridge. 2007. 400 p.
9. Paull C.K., Dallimore S.R., Caress D.W., et al. Active mud volcanoes on the continental slope of the Canadian Beaufort Sea // Geochem. Geophys. Geosyst. 2015. 16. 3160–3181. <https://doi.org/10.1002/2015GC005928>
10. Hart P.E., Pohlman J.W., Lorenson T.D., Edwards B.D. Beaufort Sea Deep-water gas hydrate recovery from a seafloor mound in a region of widespread BSR occurrence / In Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011), Edinburgh, Scotland. 2011. 16 p. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70156455>
11. Mackay J.R. Pingo Growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula Area, Western Arctic Coast, Canada: a long-term field study // Géographie physique et Quaternaire. 1998. 52 (3). 271–323. <https://doi.org/10.7202/004847ar>
12. 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. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-1-51-66>
13. Богоявленский В.И., Ерохин Г.Н., Никонов Р.А., Богоявленский И.В., Брыксин В.М. Изучение зон катастрофических выбросов газа в Арктике на основе пассивного микросейсмического мониторинга (на примере озера Открытие) // Арктика: экология и экономика. 2020. № 1 (37). С. 93–104. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-1-93-104>
14. 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. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-3-6-22>
15. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Yakushev V., Sevastyanov V. Permanent Gas Emission from the Seyakha Crater of Gas Blowout, Yamal Peninsula, Russian Arctic // Energies. 2021. 14. 5345. <https://doi.org/10.3390/en14175345>

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. 20 p. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020071>
17. *Холодов В.Н.* Термобарические обстановки глубин осадочно-породных бассейнов и их флюидодинамика. Сообщение 2. Сверхвысокие давления и грязевые вулканы // *Литоология и полезные ископаемые*. 2019. № 1. С. 44–59.
18. *Нежданов А.А., Новопашин В.Ф., Огибенин В.В., Ахмедсафин С.К., Варягов С.А.* Грязевой вулканизм на севере Западной Сибири. // *Сб. научных трудов ООО “ТюменНИИгипрогаз”: Геология и геологоразведка 2011 г.* Тюмень: Флат, 2011. С. 73–79.
19. *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.
20. *Эдельштейн К.К., Алабян А.М., Горин С.Л., Попрядухин А.А.* Гидрологические особенности крупнейших озер полуострова Ямал // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2017. № 10. С. 3–16. <https://doi.org/10.17076/lim571>
21. *Etioppe G.* Natural Gas Seepage. The Earth’s Hydrocarbon Degassing. Springer. 2015. 203 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14601-0>
22. *Миронюк С.Г., Иванова А.А., Хлебникова О.А.* Флюидогенные формы рельефа как индикаторы нефтегазоносности недр. Шельфа / *Труды VII Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)” Том II (IV).* Тверь: ООО “ПолиПРЕСС”, 2019. С. 120–125.

NEW DATA ON MUD VOLCANISM IN THE ARCTIC ON THE YAMAL PENINSULA

Corresponding Member of the RAS V. I. Bogoyavlensky^{a, #}

^a*Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: geo.ecology17@gmail.com*

A wide range of geological and geophysical methods was carried out on the Yamal Peninsula in the Arctic in the period 2014–2022. The results were analyzed together with data from remote sensing of the Earth. Fundamentally new data on the gas-dynamic mechanisms of dangerous processes in permafrost have been obtained. These data included catastrophic gas blowouts and explosions with the formation of giant craters. More than three thousand zones of powerful gas blowouts with the formation of craters at the bottom of thermokarst lakes, rivers, and the coast of the Kara Sea have been discovered. According to data on remote sensing of the Earth, large mud volcanic structures, located at the bottom of the Labvarto and Yambuto thermokarst lakes, were discovered on the Yamal Peninsula in 2022–2023 for the first time. Monitoring of their state with the use of retrospective satellite images showed the presence of periodic release of underground fluids, including gas. A conclusion was made about the discovery of active mud volcanoes on the Yamal Peninsula

Keywords: Arctic, Yamal Peninsula, Earth degassing, thermokarst lakes, gas blowouts and explosions, mud volcanoes, gas seeps, gas hydrates, remote sensing (RS)