

НОВЫЕ ДАННЫЕ ОБ ИНТЕНСИВНОЙ ДЕГАЗАЦИИ ЗЕМЛИ В АРКТИКЕ НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ: ТЕРМОКАРСТОВЫЕ ОЗЕРА С КРАТЕРАМИ ВЫБРОСОВ ГАЗА И ГРЯЗЕВЫМИ ВУЛКАНАМИ

В. И. Богоявленский, Р. А. Никонов, И. В. Богоявленский
Институт проблем нефти и газа РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 25 мая 2023 г.

Для цитирования

Богоявленский В. И., Никонов Р. А., Богоявленский И. В. Новые данные об интенсивной дегазации Земли в Арктике на севере Западной Сибири: термокарстовые озера с кратерами выбросов газа и грязевыми вулканами // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 3. — С. 353—368. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-353-368.

В последнее десятилетие на севере Западной Сибири авторами выполнен большой объем комплексных исследований, позволивших получить принципиально новую информацию о газодинамических механизмах опасных процессов в криолитозоне Арктики. По данным дистанционного зондирования Земли, на дне термокарстовых озер, рек и прибрежных зон Карского моря обнаружено свыше 4,5 тысяч зон мощных выбросов газа с формированием кратеров-покмарок. Имеются основания считать, что мощные выбросы газа преимущественно происходят из неглубоко залегающих залежей со сверхвысокими (сверхлитостатическими) давлениями. Впервые на дне арктических термокарстовых озер обнаружены крупные грязевулканические поднятия с явно выраженными кратерами. На основе мониторинга обстановки по ретроспективным космоснимкам на озерах Открытие, Лабварто и Ямбута доказано наличие периодических выбросов пластовых флюидов, включая газ. По совокупности ряда признаков обнаруженные объекты с высоким уровнем вероятности могут быть отнесены к активным грязевым вулканам. Результаты исследований позволяют утверждать, что в Циркумарктическом мегарегионе широко распространен грязевой вулканизм.

Ключевые слова: Арктика, Западная Сибирь, Ямал, дегазация Земли, термокарстовые озера, талики, выбросы и взрывы газа, грязевые вулканы, газогидраты, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ).

1. Введение

Среди научных исследований в Арктике в последнее десятилетие резко возрос интерес к проблемам дегазации Земли, что в основном обусловлено наблюдающимся стабильным глобальным ростом концентрации парниковых газов (в основном двуокиси углерода и метана) в атмосфере и наибольшими темпами потепления в Циркумарктическом регионе

[1—4]. Очевидно, что потепление в Арктике расширяет масштабы деградации многолетнемерзлых пород (ММП), которая интенсифицирует выбросы парниковых газов в атмосферу, что, в свою очередь, способствует дальнейшему потеплению климата. Однако реальные масштабы этого явления неочевидны и дискуссионны. Вопросам изучения распространения аномальных зон и основных причин интенсивной эмиссии газа в атмосферу в Арктике и Мировом океане посвящены многие сотни работ, включая [1—11].

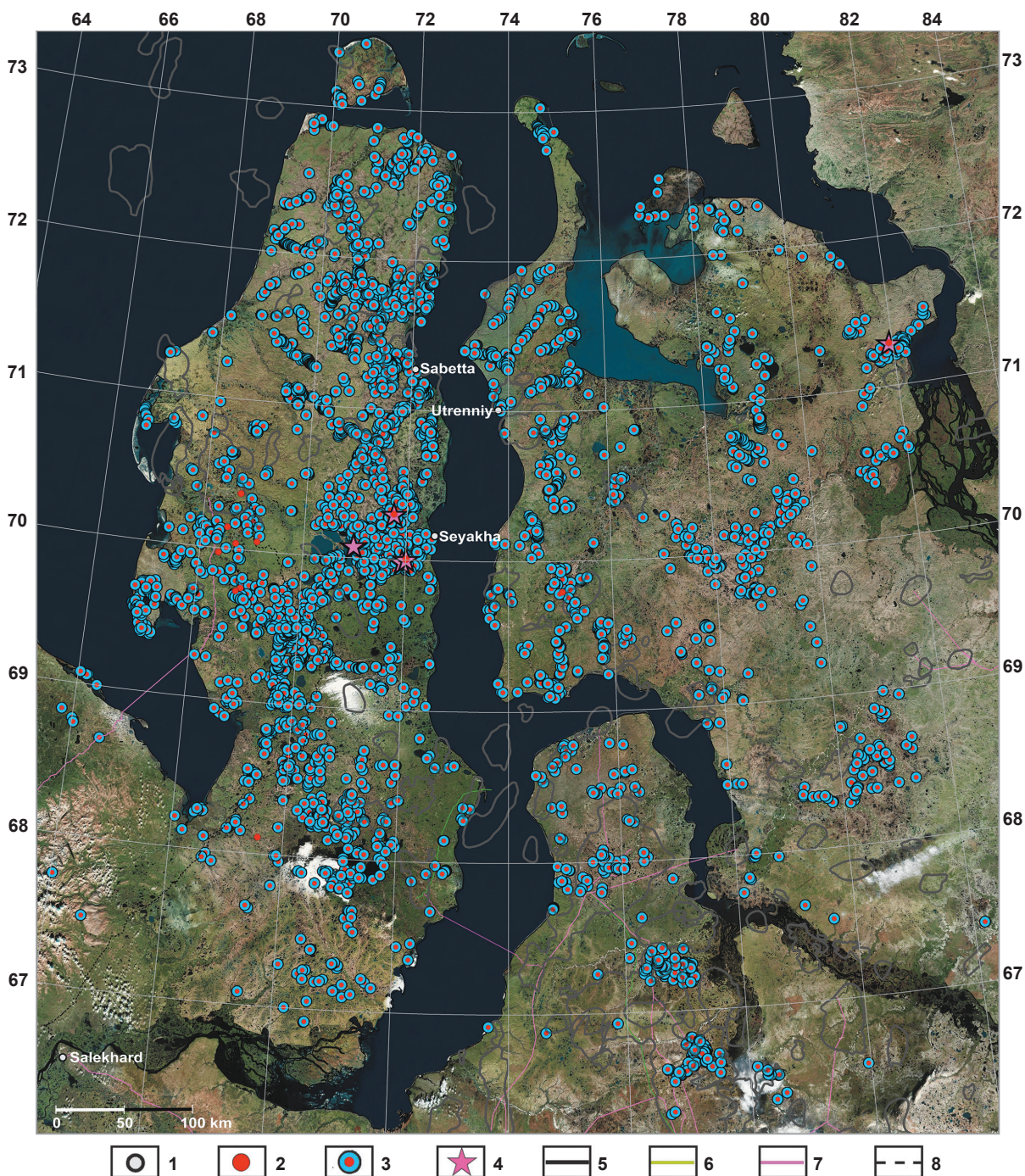


Рис. 1. Распространение зон мощных выбросов газа на севере Западной Сибири. Обозначения: 1 – населенные пункты, 2 – обособленные кратеры выбросов газа, 3 – кратеры выбросов газа на дне водоемов, 4 – грязевулканические проявления, 5 – контуры нефтегазовых месторождений, 6 – нефтепроводы, 7 – газопроводы, 8 – железная дорога. Основа карты – мозаика космоснимков базы ESRI

Fig. 1. Distribution of powerful gas blowout zones in the North of Western Siberia. Legend: 1 – settlements, 2 – isolated craters of gas blowouts, 3 – craters of gas blowouts on the water bottom, 4 – mud volcanic manifestations, 5 – contours of oil and gas fields, 6 – oil pipelines, 7 – gas pipelines, 8 – railway. The base map is a mosaic of satellite images by ESRI

В 1965—1969 гг. на Шотландском шельфе (Новая Шотландия, Канада) были впервые зафиксированы зоны выходов газа со дна морей в виде подводных кратеров диаметром от 15 до 45 м и глубиной 5—10 м, названных покмарками (rockmarks) [12].

Обнаружение покмарок как нового опасного природного феномена, связанного с дегазацией Земли, привлекло внимание многих исследователей, следствием чего явился ряд статей об их нахождении в различных частях Мирового океана [13—16].

Кроме того, в начале 1970-х годов на полуострове Тазовский в районе Уренгойского и Самбургского нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ) были обнаружены термокарстовые озера, на дне которых наблюдались многочисленные выходы газа в виде кратеров-грифонов различного диаметра [17], являющихся аналогами выше отмеченных поymarок. Полувековые исследования не снизили интерес к данному явлению, и его изучение по-прежнему активно продолжается [1; 2; 10; 11; 18—25].

В последнее десятилетие эти исследования были значительно расширены Институтом проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН на основе применения данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса в оптическом диапазоне частот сверхвысокого разрешения, а также во время экспедиций [21—25]. В результате этих работ на севере Западной Сибири (полуострова Ямал, Гыданский и Тазовский) обнаружено свыше 4,5 тысяч зон мощных выбросов газа со дна мелководных частей прибрежных зон Карского моря, рек и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа (ТОКВГ) (рис. 1) [21—23]. Кроме того, на суше севера Западной Сибири обнаружено около 20 гигантских кратеров в криогенной толще, образовавшихся в результате мощных выбросов-взрывов газа (см. рис. 1) [11; 26; 27].

Одной из широко распространенных опасных форм дегазации Земли являются грязевулканические извержения. Согласно ГОСТ Р 57123-2016 [28], грязевыми вулканами (ГВ) являются «...геологические образования, постоянно или периодически извергающие грязевые массы и газы... В местах ранее существовавших разломов могут быть грязевые вулканы».

В уникальном по полноте обобщения атласе, составленном азербайджанскими учеными [29], приведены данные о 2505 ГВ и грязевулканических проявлениях, включая 1401 (55,9%) на дне Мирового океана. Грязевой вулканизм, без сомнения, — одно из самых опасных природных явлений, при котором мощные выбросы газа часто самовоспламеняются и взрываются. Высота горящих факелов ГВ может достигать нескольких сотен метров, упоминается более 500 м [29; 30], а в 1940 г. на грязевулканическом острове Харе-Зиря (до 1991 г. — Булла, 39,996° N, 49,644° E) — даже 1200 м [30, с. 18]. По нашему мнению, подтвержденному рядом имеющихся фактов, самовоспламенения и взрывы газа при извержениях ГВ происходят за счет возникающей электризации пространства и электростатических разрядов [11; 25], а столь высокие факелы свидетельствуют о гигантских объемах выбрасываемого газа (многие миллионы кубометров).

Триггерами для ГВ являются землетрясения, но и сами ГВ порождают сейсмические события. Наличие ГВ — один из поисковых признаков на нефть и газ, при этом они предоставляют значимую информацию о литологии осадочной толщи, охваченной грязевулканическим процессом [11; 25; 29; 30].

Изученность распространения ГВ в Арктике находится на начальной стадии: в большинстве обобщающих публикаций говорится лишь об одном-трех вулканах [29—31]. Традиционно основные грязевулканические бассейны привязываются к зонам распространения альпийского тектогенеза, что снижает интерес исследователей к поиску ГВ в Арктике. Однако в Циркумарктическом мегарегионе существуют осадочные бассейны с мощными комплексами терригенных мезо-кайнозойских отложений, в которых они вполне могли сформироваться. Отметим, что в результате детальных исследований геологическими службами США и Канады (USGS и GSC) ряда пингоподобных поднятий (PLF — pingo-like features) в море Бофорта более 10 из них были признаны ГВ [32; 33]. Анализ опубликованных материалов позволяет утверждать о существовании несравнимо большего количества ГВ на дне моря Бофорта в районе открытия многих сотен еще недостаточно изученных PLF.

Кроме того, уже открыты ГВ и есть признаки их существования в других частях Циркумарктического мегарегиона как на море, так и на суше [25; 32—38], включая сушу на севере Западной Сибири [25; 35; 36]. В частности, на Тазовском полуострове в районе Песцового месторождения А. А. Неждановым [35] обнаружены «следы отдельного грязевого потока на склоне крупного холма». На севере Гыданского полуострова вблизи Дерябинского кратера С4 (южнее на 250 м) на локальном участке 35×110 м с двумя коническими возвышенностями В. А. Епифановым [36] обнаружено изобилие кусков инородных горных пород, возможно, вынесенных из глубоких отложений грязевулканическим извержением.

Целью данной работы является выявление в российской Арктике новых опасных объектов дегазации Земли грязевулканического генезиса. Приоритетным регионом выбрана северная часть Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна, включая полуостров Ямал, на котором уже около десятилетия ведется добыча углеводородов на Новопортовском, Бованенковском и Южно-Тамбейском месторождениях.

2. Методы исследований

Начиная с 2014 г. ИПНГ РАН провел на полуострове Ямал большой объем экспедиционных исследований нового опасного явления — взрывной дегазации Земли с формированием гигантских кратеров на суше и дне термокарстовых озер, рек и прибрежных зон Карского моря [11; 21—27; 38]. Комплексные полевые геолого-геофизические работы включали эхолокацию, георадиолокацию, сейсморазведку, аэрофотосъемку с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), бурение неглубоких скважин и геохимический анализ взятых проб газов.

Особо важные результаты достигнуты с применением БПЛА [21; 26; 27], позволивших получить принципиально новые данные в трех- и четырехмерном

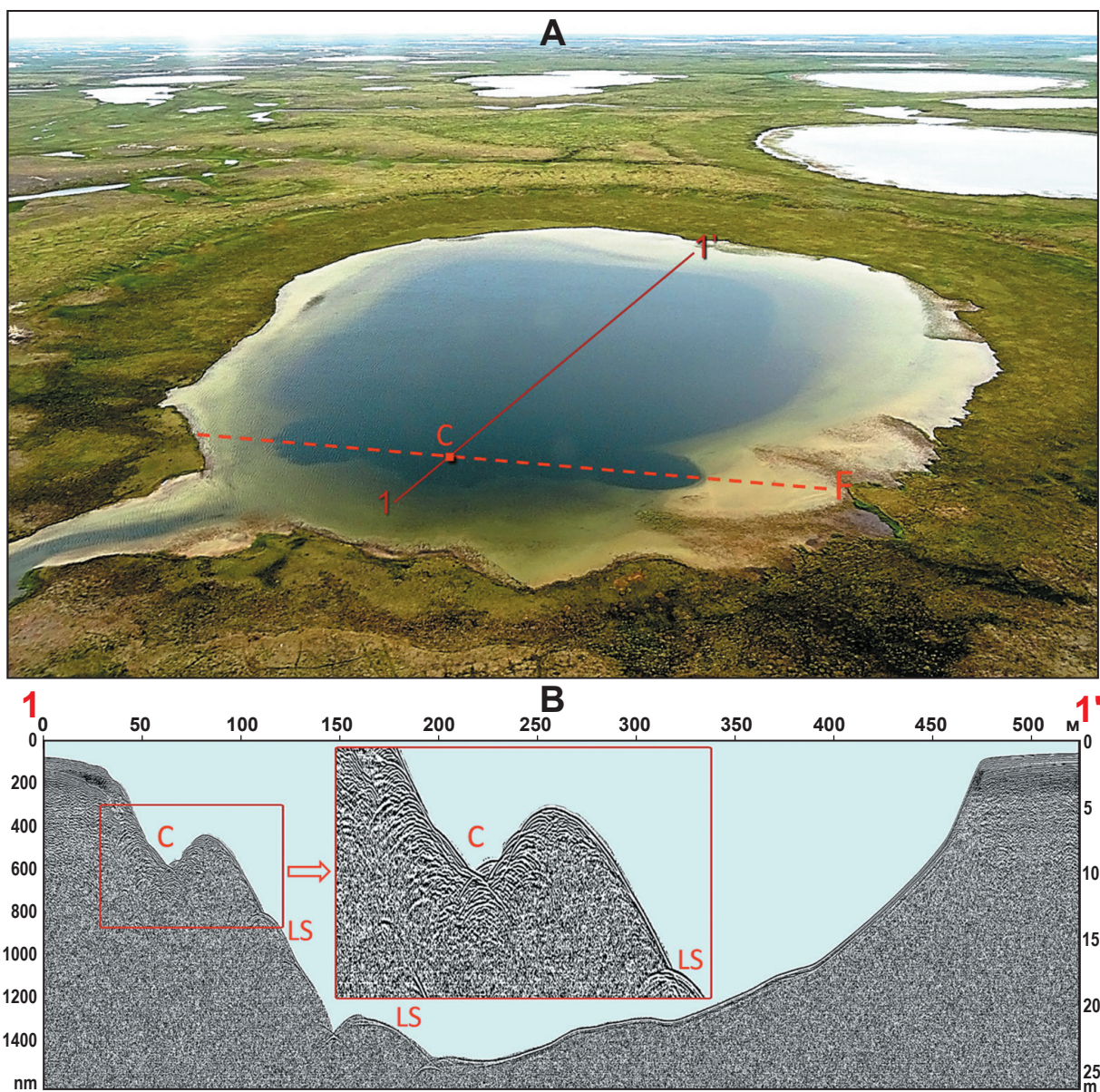


Рис. 2. Аэрофотоснимок из вертолета термокарстового озера Открытие (А) и георадиолокационный профиль (В) с увеличенным фрагментом в районе кратера. Обозначения: 1-1' – положение профиля, F – прогнозируемое положение простираения разлома, C – кратер выброса газа, LS – оползневые тела

Fig. 2. Aerial photograph of the thermokarst lake Otkrytiye from a helicopter (A) and ground penetrating radar (GPR) profile (B) with an enlarged fragment in the crater area. Legend: 1-1' – position of B profile, F – predicted position of the fault extension, C – gas blowout crater, LS – landslides

форматах (3D-4D). При этом цифровая фотограмметрическая обработка выполняется с применением специализированного программного обеспечения Pix4Dmapper (Pix4D SA, Швейцария) и Agisoft Metashape Professional (Geoscan, Россия) [39].

Геопространственные данные об обнаруженных зонах интенсивной дегазации Земли накапливаются в геоинформационной системе «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО») наряду с другими данными, формирующими базу «Big Data» на основе программного обеспечения ArcGIS (ESRI, США) (в качестве примера см. рис. 1) [11; 21–27].

При комплексных исследованиях в Арктике особо важная информация получена по данным мультиспектральных и радиолокационных ДЗЗ из космоса. При исследованиях используются данные различного пространственного разрешения, включая сверхвысокое разрешение (до 1 м) — KeyHole (KH) программы Corona (США), WorldView (WV), QuickBird (QB), Ресурс-П (до сентября 2021 г.) и Канопус-В, а также высокое, среднее и низкое разрешения (10–80 м) — Sentinel (S), Landsat (LS) и др. Уникальную мониторинговую информацию предоставляет ретроспективный анализ состояния изучаемых

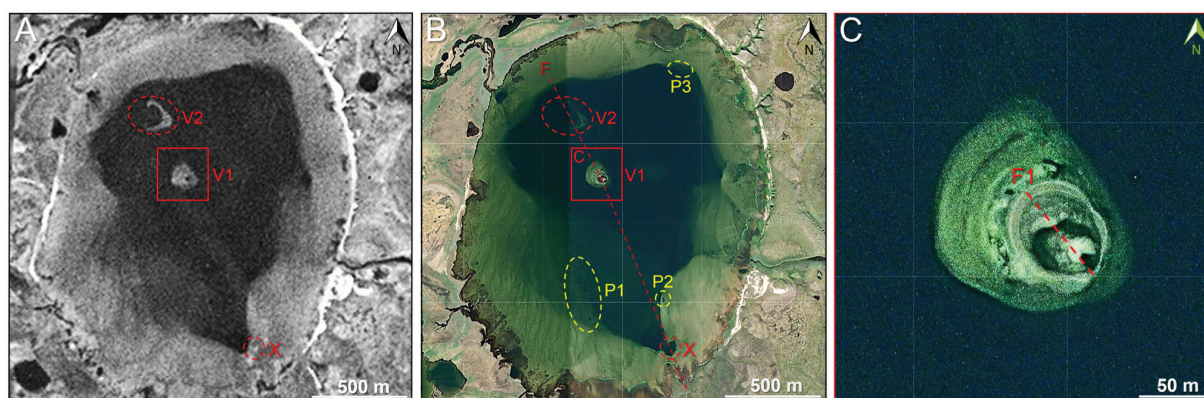


Рис. 3. Космоснимки термокарстового озера Лабварто КН-9 (А) и WV-4 (В) с его увеличенным фрагментом (С) (база ESRI). Обозначения: P1, P2 и P3 — покмарки, V1 и V2 — грязевые вулканы, X — вероятный объект выброса газа, F и F1 — прогнозируемые разломы

Fig. 3. Satellite images of the thermokarst lake Labvarto KH-9 (A) and WV-4 (B) with its enlarged fragment (C) from ESRI database. Legend: P1, P2 and P3 — pockmarks, V1 and V2 — mud volcanoes, X — probable place of gas blowout, F and F1 — predicted faults

мых объектов с возможной глубиной поиска около 60 лет (спутники КН) [11; 21—27; 41—43]. Большой информативностью обладают 3D-4D построения цифровых моделей рельефа ArcticDEM (США) [26; 27; 42—44].

3. Результаты исследований

На полуострове Ямал более чем на трех тысячах термокарстовых озер обнаружены прямые признаки интенсивной дегазации недр в виде кратеров-покмарок и вмержших в лед пузырей газа (см. рис. 1). Для части объектов дегазации на дне термокарстовых озер авторы обосновали грязевулканический механизм извержений согласно ГОСТ Р 57123-2016 [28]. В частности, в центральной части полуострова Ямал на основе экспедиционных исследований и по данным ДЗЗ обнаружены озера Открытие, Лабварто и Ямбуто, на дне которых при прозрачной воде наблюдаются крупные кратеры, в том числе в вершинах поднятий конической формы, идентифицированных нами как грязевулканические постройки.

3.1. Термокарстовое озеро Открытие

Термокарстовое озеро Открытие размером 440×750 м расположено в центральной части полуострова Ямал (70,006° N, 72,01° E, см. рис. 1 и 2А). Название озера Открытие было дано нами после получения принципиально новой важной информации о газодинамических явлениях в Арктике [21; 22; 45]. Весной 2019 г. со дна этого озера произошел феноменально мощный выброс (пневматический взрыв) газа, разбивший ледовый покров толщиной около 1,5 м и раскидавший огромные глыбы льда на удаления свыше 50 м от эпицентра взрыва.

Ретроспективный анализ космоснимков спутников Sentinel-2 (S-2) и Landsat-8 (LS-8) в процессе таяния льда (май-июнь) доказал, что выбросы газа происходили в одном и том же месте в зимнее вре-

мя ежегодно в 2016—2019 гг., однако в 2020—2023 гг. свидетельства значительных выбросов газа во льду не были обнаружены.

По данным ДЗЗ сверхвысокого разрешения и на основе экспедиционных работ (см. рис. 2А) на дне ТОКВГ Открытие обнаружено четыре соседствующих крупных кратера (с диаметрами от 30 до 45 м), расположенные линейно вдоль прогнозируемого глубинного субмеридионального разлома (азимут 345°), а также несколько кратеров небольшого диаметра (до 4—6 м) (см. рис. 2В). По данным проведенной в 2019 г. эхолокации глубины четырех крупных кратеров составляют 4—5 м. По данным микросейсморазведки 4D азимут простирания выделенного глубинного разлома, прослеженного до основного газоносного горизонта сеномана, составил 325° [45].

Проведение экспедиционных работ с применением эхолокации и георадиолокации позволило обнаружить оползневые тела (LS) на стенках кратеров и дне озера, сформированные извергнутой из жерл предположительно суглинистой породой. В связи с вышесказанным четыре подводных объекта с крупными кратерами на озере Открытие согласно [28] с высокой вероятностью могут быть отнесены к ГВ. Подробнее результаты комплексных исследований на озере Открытие приведены в работах [21; 22; 45].

3.2. Термокарстовое озеро Лабварто

Термокарстовое озеро Лабварто (69,985° N, 71,9354° E), название которого в переводе М. Н. Окотетто с ненецкого языка означает «озеро Обвалившихся берегов», имеет размеры 1550×2140 м, расположено в 3,7 км к юго-западу от кратеров озера Открытие и в 32 км к востоку от озера Ямбуто. На рис. 3А и 3В приведены летние космоснимки озера Лабварто сверхвысокого пространственного разрешения со спутников КН-9 22 августа 1976 г. (разрешение 60 см) и WV-4

26 августа 2018 г. (разрешение 30—50 см), в основном свидетельствующие о незначительных изменениях за полувековой период. На этих снимках в центральной и северо-западной частях озера наблюдаются два крупных поднятия V1 и V2, удаленные от берега на 580 и 310 м и отождествляемые нами с грязевулканическими постройками. Также на космоснимке (рис. 3В) на мелководном дне обнаружены три зоны существования небольших кратеров-покмарок (P1, P2 и P3), не видимых на рис. 3А. Кроме того, на рис. 3А наблюдается объект X, дешифрованный нами как поднятие (игра теней Солнца [22; 42]), а на рис. 3В на его месте находится кратероподобный объект эллиптической формы размером 45×80 м. Весьма вероятно, что поднятие X являлось бугром пучения газодинамического генезиса, а кратероподобный объект образовался за счет выброса-взрыва газа подобно другим кратерам на Ямале [11; 26; 27].

Важно отметить, что соединяющая центры поднятий V1 и V2 линия F (см. рис. 3В) имеет северо-западную ориентацию по азимуту около 333°, а ее продолжение на юго-восток попадает точно в центр зоны кратеров P2. Кроме того, линия между центрами поднятия V1 и кратероподобной впадины X имеет азимут 337°, а средний азимут между двумя рассчитанными выше азимутами равен 335°. Наиболее вероятно, что линия F отображает положение глубинного разрывного нарушения — разлома F.

Западная сторона поднятия V2 предположительно находится в полуразрушенном (размытом) состоянии, поэтому ниже мы подробно рассмотрим только поднятие V1. Основаниями для отнесения объекта V1 к ГВ являются его характерная коническая слегка асимметричная форма и наличие явного кратера/кальдеры с эруптивными каналами (жерлами), хорошо видимыми на увеличенном фрагменте (рис. 3С). 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 [29; 31].

Верхняя часть объекта V1 оконтуривает кальдеру эллиптической формы с ориентацией большой оси F1 в северо-западном направлении по азимуту 323°, что предположительно также связано с разломной тектоникой. 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 ГВ близка к этим величинам. За счет новых извержений грязебрекнии вершина ГВ может периодически подниматься выше уровня воды, но ее формирование ограничивается размы-

ванием и ежегодным срезанием движущимся по ветру тающим льдом. Отметим, что на топографической карте 1980-х годов масштаба 1:50 000 на месте вершины V1 показан остров размером 75×85 м. В связи с тем, что картографические построения времен СССР выполнялись на основе дешифрирования аэрофотоснимков, возможно, что наличие острова показано ошибочно, что вполне допустимо даже на основе космоснимков KH-9 и WV-4 на рис. 3.

В результате комплексного мониторингового анализа серии доступных космоснимков Sentinel-2 L1C (S-2) Европейского космического агентства ESA высокого разрешения (10 м) в течение девяти лет (2015—2023 гг.) на озере Лабварто обнаружены прямые признаки эмиссии флюидов из вершин вулканоподобных объектов V1 и V2, часть которых проиллюстрирована ниже. К сожалению, в связи с очень частой облачностью над полуостровом Ямал большая часть космоснимков S-2 (до 80—90%) оказалась некондиционной.

Во время весеннего таяния льда в мае-июне 2016—2023 гг. на космоснимках S-2 наблюдаются обособленные проталины во льду (рис. 4). Обычно они возникают в зонах уменьшения толщины льда благодаря включениям пузырей газа и/или периодического возникновения пробоев во льду при мощных выбросах газа [11; 46]. Такие эффекты часто наблюдаются на космоснимках над многими известными нам природными зонами интенсивной эмиссии газа со дна озер, включая озеро Открытие [11; 41; 45], а также на техногенных водоемах (затопленных кратерах) в районах катастрофических выбросов газа на Губкинском, Кумжинском, Харасавэйском и Бованенковском месторождениях [11; 46]. По данным безоблачных космоснимков Sentinel-2 L1C, проталины на озере Лабварто фиксировались в 2021 г. с 30 мая по 19 июня, в 2022 г. с 19 мая по 9 июня, а в 2023 г. с 29 мая по 6 июня (см. рис. 4). Проталина над вершиной V1 во всех случаях была существенно крупнее, чем над V2, что, видимо, свидетельствует о больших флюидопотоках из объекта V1.

В летне-осенний безледный период (июнь-октябрь) 2015—2023 гг. на космоснимках S-2 на озере Лабварто ежегодно часто наблюдались относительно короткие (от 80 до 500 м) шлейфы флюидов белесого цвета (рис. 5), выходящих из вершин V1 и V2 и распространяющихся по направлению перемещения приповерхностного слоя воды ветром. На космоснимках в оптическом диапазоне белесый цвет воды возникает за счет увеличения альбедо при наличии светлых грязевых (мутявых) потоков, пузырей газа (струй газа), выхода пластовых вод с растворенным газом, выделяющимся в виде пузырей за счет снижения давления (декомпрессии) [25]. В 2021 г. белесые флюидопотоки были зафиксированы 6, 23 и 24 июля, 19 и 27 сентября, а в 2022 г. — 7, 8, 20 августа и 12 сентября. Согласно рис. 5, наиболее протяженные (интенсивные?) флюидопотоки были в 2016 г. (13 июня и 2 сентября), в 2020 г. (12 и 28 августа,

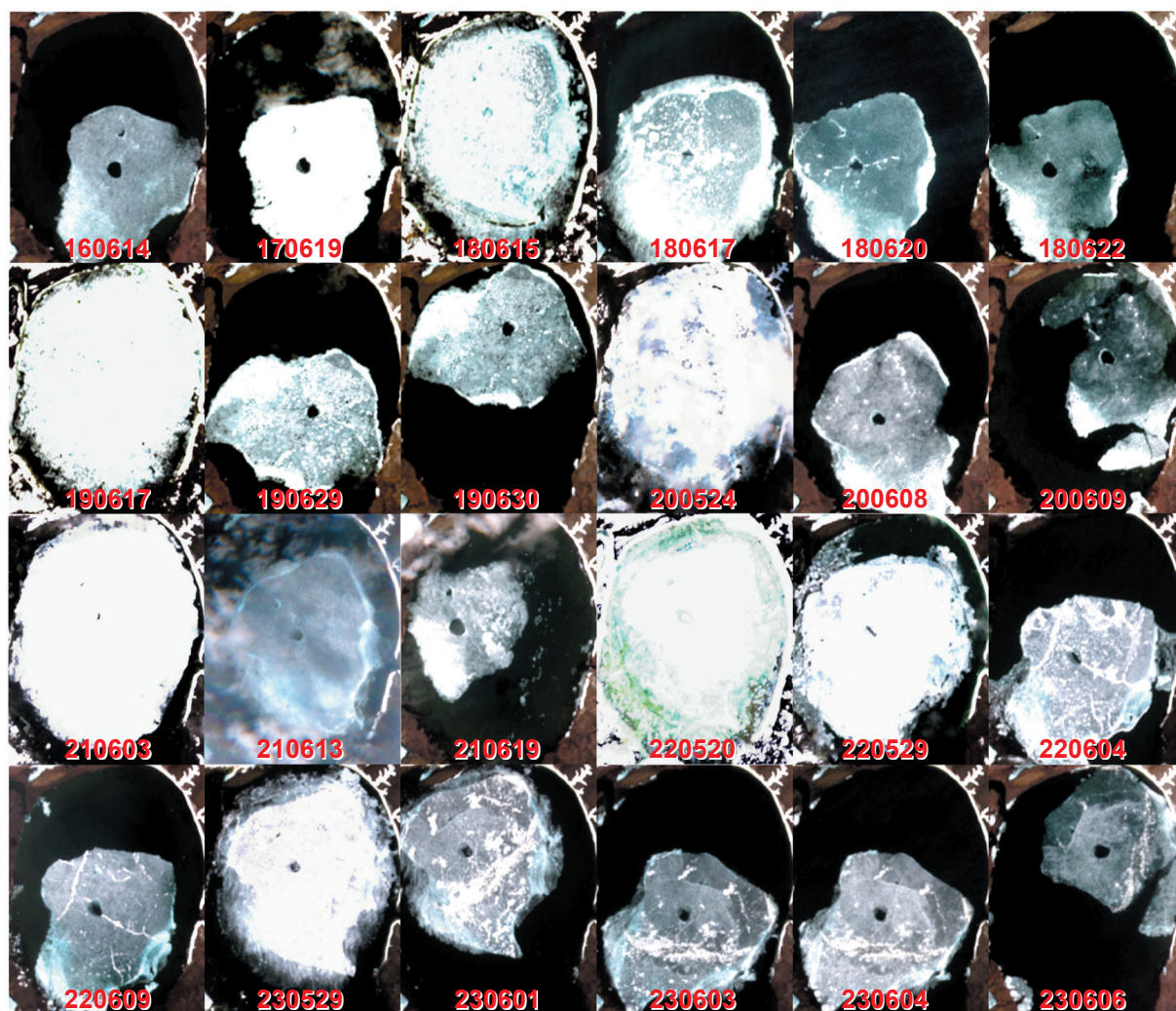


Рис. 4. Мониторинг ледовой обстановки на термокарстовом озере Лабварто на основе космоснимков Sentinel-2 в мае-июне 2016–2023 гг. (цифровые обозначения – год, месяц, день)

Fig. 4. Ice condition monitoring on the Labvarto thermokarst lake based on Sentinel-2 satellite images from May-June 2016–2023. (numbers – year, month, day)

14 сентября) и в 2022 г. (7 и 8 августа). Однако возможно, что это объясняется силой ветра. В первой половине лета 2023 г. флюидопотоки зафиксированы на снимках в период с 16 июля по 7 августа (16, 18, 21, 23, 24, 26 июля и 2, 3, 5, 7 августа), при этом они, видимо, были непрерывными, но различной интенсивности (см. рис. 5). Самые интенсивные флюидопотоки были 23 июля (из V1 и V2), а самые слабые — 28, 31 июля и 5, 7 августа.

Дополнительная информация по озеру Лабварто была получена по космоснимкам спутников Landsat (LS), доступным с 18 июня 1985 г. по настоящее время. Космоснимки LS-5, LS-7 и LS-8 имеют низкое и среднее пространственные разрешения (60, 30 и 15 м соответственно), в связи с чем их информативность существенно ниже, чем у S-2. Несмотря на очень ограниченное количество кондиционных снимков, они позволили сделать ряд нижеследующих выводов. По данным LS-7, мутьевые шлейфы наблю-

дались 13 августа 2001 г., 24 июля 2008 г., 27 июля 2009 г., а по данным LS-8 — 28 сентября 2014 г. Пробойны во льду на месте исследуемых объектов в июне наблюдаются ежегодно (когда доступны снимки): 18 июня 1985 г., 8 июля 1987 г., 27 июня 1998 г. (LS-5); 10 июня 2000 г., 27 июня 2004 г., 29 июня 2007 г. (LS-7); 22 июня 2014 г. и 2 июня 2015 г. (LS-8).

Интересно, что на снимке LS-7 от 16 июля 2000 г. в озере наблюдается сильное замутнение воды, возможно, связанное с интенсивными грязевыми выбросами. Отметим, что 22 июля 1972 г. (спутник KH-4) вода во всем озере также была мутной, однако вершина объекта V1 была видна, что, возможно, связано с ее возвышением над уровнем воды.

Все приведенные результаты анализа данных ДЗЗ в совокупности с космоснимками рис. 3, 4 и 5 позволяют с высокой вероятностью сделать вывод, что грязевулканические объекты V1 и V2 образовались намного раньше 1970-х годов.

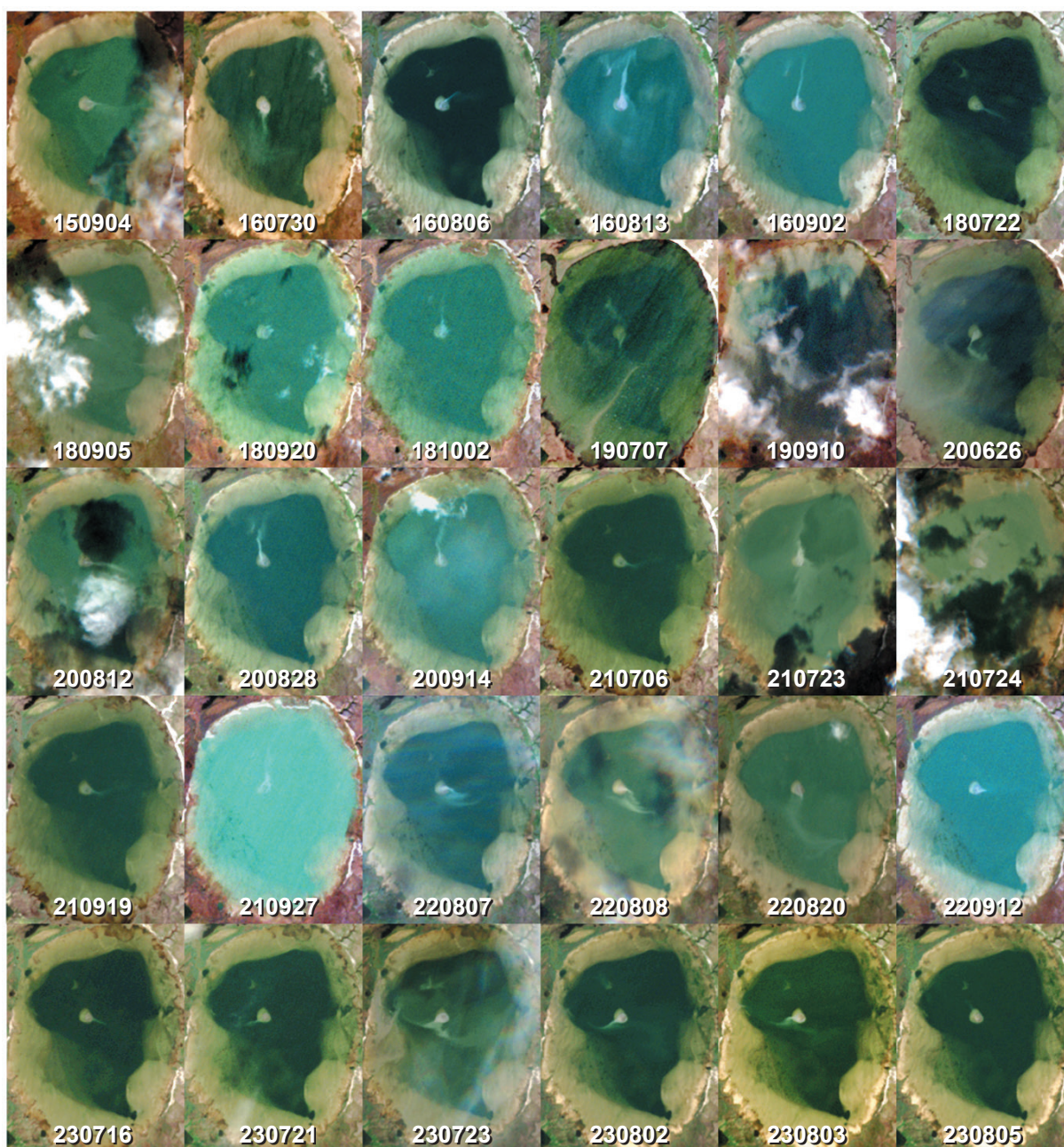


Рис. 5. Мониторинг флюидопроявлений на термокарстовом озере Лабварто на основе космоснимков Sentinel-2 2015–2023 гг. (цифровые обозначения – год, месяц, день)

Fig. 5. Fluid manifestations monitoring on the Labvarto thermokarst lake based on Sentinel-2 satellite images from 2015–2023 (numbers – year, month, day)

3.3. Термокарстовое озеро Ямбута

Термокарстовое озеро Ямбута (в переводе М. Н. Окотетто с ненецкого языка — «Длинное озеро») расположено в центральной части полуострова Ямал немного восточнее (в 0,4–3,3 км) от трех крупных Нейтинских озер (Нейто — «Налимье озеро»). Оно третье на Ямале по площади водной поверхности (169 км²), но самое длинное (22 км) и водоемкое (около 2,35 км³) [47]. Озеро Ямбута считается самым глубоким из-за наличия в северной части локальных впадин с глубинами до 59

и 63,7 м (возможные кратеры выбросов газа), при этом его средняя глубина около 14 м [47]. В связи с редкой (региональной) сетью эхолокационных профилей, отработанных в 2007 г. сотрудниками МГУ [47], не вызывает сомнений существование на дне озера пропущенных локальных объектов, как впадин, так и поднятий.

В северо-восточной части озера Ямбута на основе космоснимков сверхвысокого разрешения впервые обнаружены три крупных конусообразных поднятия (70,0762° N, 70,9856° E) (рис. 6). Видимые нижние

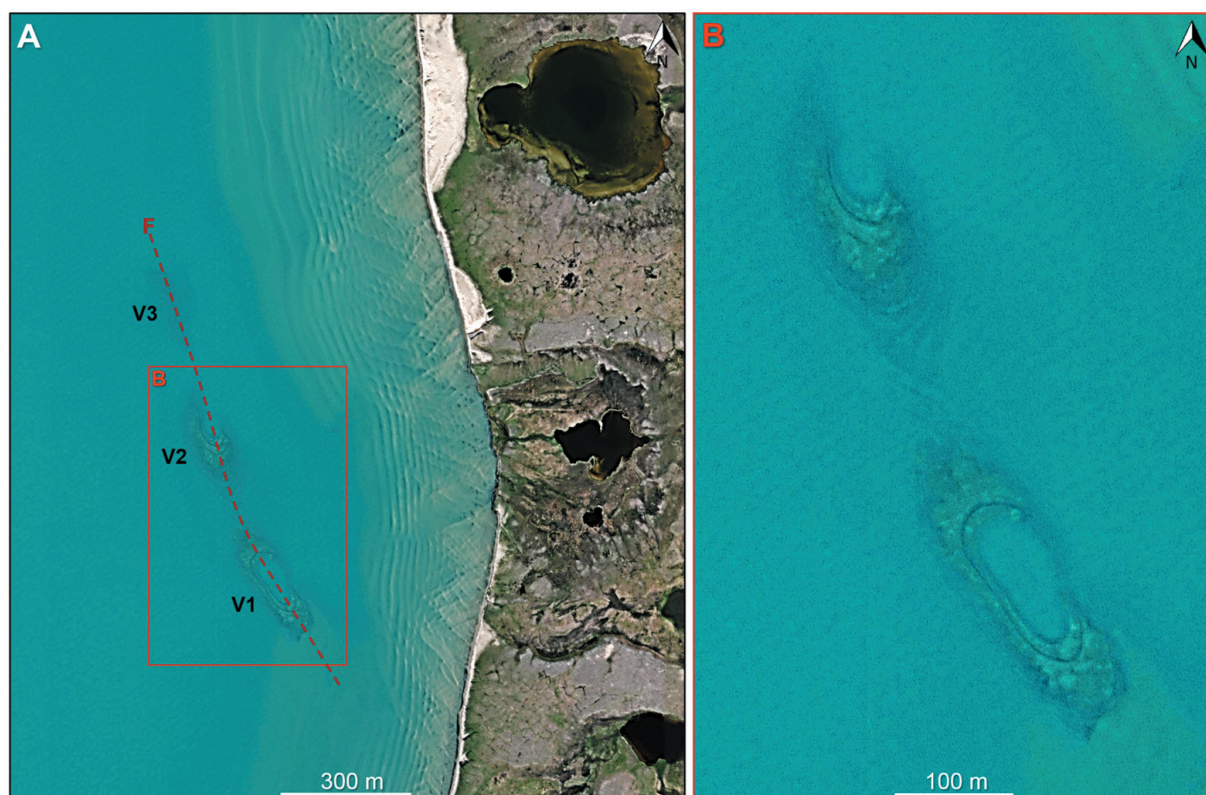


Рис. 6. Космоснимок WorldView-2 20 июля 2022 г. участка термокарстового озера Ямбуто (А) с его увеличенным фрагментом (В) (база ESRI). Обозначения: V1, V2 и V3 — грязевые вулканы, F — прогнозируемое положение разлома
Fig. 6. WorldView-2 satellite image from July 20, 2022 of a part of the Yambuto thermokarst lake (A) with its enlarged fragment (B) from ESRI database. Legend: V1, V2 and V3 — mud volcanoes, F — predicted position of the fault

части этих объектов имеют эллиптическую форму, а их латеральные размеры равны 90×315 м (V1), 90×270 м (V2) и 50×210 м (V3). При этом соотношения осей эллипсов составляют 1:3,5; 1:3,0 и 1:4,2 ($K_{\text{ср}}$ — 0,29, 0,33 и 0,24). Центры этих объектов удалены от берега на 490 (V1), 620 (V2) и 650 м (V3). Из-за невидимости дна около этих поднятий можно предположить, что их реальные размеры около оснований несколько больше. В частности, поднятие V1, видимо, имеет протяженность 380—400 м и ширину более 120 м. С учетом редкой сети эхолокации [47] прогнозные высоты анализируемых поднятий достигают и, возможно, даже превышают 10 м.

Важной особенностью расположения объектов V1, V2 и V3 является то, что их длинные оси лежат вдоль слегка искривленной линии F, весьма вероятно, отображающей линию пересечения дна глубинным разломом северо-западной ориентации по азимутам от 328° (около V1) до 342° (около V2 и V3), в среднем 335°. Это точно совпадает со средним азимутом прогнозируемого разлома на озере Лабварто. Отметим, что продолжение линии F на восточный берег ложится точно на систему оврагов, что дополнительно усиливает обоснование существования разлома F.

На хорошо видимых вершинах поднятий V1 и V2 наблюдаются многие специфические элементы их строения (см. рис. 6В). Среди них особо выделим

впадины-кратеры (кальдеры) в центральных частях эллиптической формы с внутренними размерами 45×120 м (V1) и 30×65 м (V2), для которых соотношения осей составляют 1:2,7 и 1:2,2 ($K_{\text{ср}}$ — 0,37 и 0,45). На краях и стенках возвышенностей V1 и V2 имеются характерные черты слоистых (натечных) 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 доступных космоснимков Sentinel-2 L1C и Landsat 2016—2022 гг. показал на озере Ямбуто периодические извержения из кальдер V1 и V2 протяженных мутьевых потоков (преимущественно из V1), распространяющихся в основном на юг по направлению преобладающих течений воды и/или ветра. Наиболее уверенно мутьевые потоки на Ямбуто 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. Можно отметить, что в летне-осеннее время активность извержений на Ямбуто значительно ниже, чем на Лабварто.

Около юго-восточной части основания V1 наблюдается более мелководная часть дна, образовавшаяся за счет периодического отложения суглинистого материала, выносимого из жерла поднятия V1 преимущественно в южном направлении.

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 в зимнее время по сравнению с объектом V1 на озере Лабварто.

4. Обсуждение полученных результатов

Термокарстовые озера характеризуются наличием несквозных или сквозных таликов, при этом предполагается, что сквозные талики развиты под не промерзающими до дна крупными озерами, имеющими размеры порядка 1,5 км и выше [48, с. 15]. Генезис таликов и характер их распространения зависят от различных экзогенных и эндогенных факторов, среди которых особо выделяются геологические воздействия, включая тектонические и гидрогеологические: «Все виды таликов... являются по существу полигенными, так как на их образование и условия существования всегда воздействуют теплопотоки из недр земли. В сквозных таликах это воздействие носит более прямой характер... Тепловой режим сквозных таликов всегда определяется также потоком тепла из недр земли, т. е. зависит от геоструктурных условий» [49, с. 24, 28].

В связи с существованием таликов термокарстовые озера являются лучшими каналами вертикальной миграции пластовых флюидов, включая углеводороды, чем окружающие их ММП. Кроме того, деградация ММП с формированием термокарстовых озер может захватывать газогидратонасыщенные зоны, что приводит к нарушению термобарических условий существования криогенных газогидратов и к их диссоциации [48; 50]. В итоге деградации ММП в зонах таликов происходят значительные изменения физических характеристик пород, включая упруго-прочностные свойства, скорость распространения упругих колебаний и проницаемость. Диссоциация газогидратов приводит к разжижению песчаноглинистых отложений, что способствует активным выбросам газа через придонные отложения с формированием подводных кратеров-покмарок и возможным процессам грязевого вулканизма.

Происхождение кратеров-покмарок объясняется преимущественно газодинамическим механизмом, который также характерен для грязевых вулканов, при этом они нередко существуют в непосредственной близости [18]. Это в ряде случаев затрудняет различие их генезиса [15]. Покмарки в основном связаны с прорывами газа из неглубоких залежей и не имеют глубоких корней, как большинство известных ГВ [18]. Однако не исключено, что после детальных исследований многие покмарки будут признаны грязевыми вулканами. Подобная ситуация возникла при детальном изучении пингоподобных структур (PLF) на дне

моря Бофорта, которые после проведения специальных работ были признаны ГВ [32; 33].

На полуострове Ямал имеются все основные факторы, сопутствующие образованию ГВ в Азербайджане: «пластичные глинистые толщи, пластовые воды, скопления углеводородных газов, тектонические разломы и... АВПД¹» [29, с. 26].

В озере Ямбуто 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 [47]. Эти явления могут быть объяснены повышенным притоком подземных флюидов, включая соленые воды (криопэги), существование которых в ММП доказано бурением на глубинах «от нескольких метров до 215 м» [48, с. 19]. При этом вскрытие криопэгов бурением обычно сопровождалось газопроявлениями.

Обращает на себя внимание сильная вытянутость (эллиптичность) оснований и кальдероидных кратеров грязевулканических построек озера Ямбуто: соотношения осей эллипсов меняется от 1:2,2 до 1:4,2 (K_{Σ} — от 0,45 до 0,24). 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) [29; 30]. В частности, в Азербайджане известны вытянутые вдоль разлома ГВ Торагай, Галмаз, Бахар Малый (Toragay, Galmaz, Bala Bakhar) и др., а также вулканические острова Харе-Зиря, Гарасу и Зенбил (Khare-Zira, Garasu, Zenbil) [29]. Вытянутые формы имеют некоторые ГВ на дне Черного моря (Водяницкого, Эколог, Манганари) и моря Бофорта (Корапоар) [29]. По данным сейсморазведки, поперечные сечения эруптивного канала также «являются эллипсами неправильной формы» [30, с. 51].

Известно, что ГВ часто встречаются группами, при этом они нередко формируют вытянутые вдоль разломов цепочки [1; 29—31; 38; 51]. На озере Открытие, расположенном в 40 км к юго-востоку от вулканоподобных построек озера Ямбуто и в 3,5 км к юго-западу от вулканоподобных построек озера Лабварто, по данным ДЗЗ, по соединяющей четыре крупных подводных кратера линии был спрогнозирован разлом по азимуту 345°. С учетом данных сейсморазведки, определивших азимут разлома в 325°, средний азимут составил 335° (см. раздел 3.1 и [45]). Этот азимут удивительно точно совпадает со средними азимутами прогнозируемых разломов на озерах Лабварто и Ямбуто (см. разделы 3.2 и 3.3). В итоге отметим, что ориентация прогнозируемых разломов на озерах Открытие, Лабварто и Ямбуто хорошо увязывается с ориентацией обособленного от Западно-Сибирской рифтовой системы Ямальского рифта (по разным данным азимут 318—330°)

¹ АВПД — аномально высокое пластовое давление.

и данными о разломной тектонике по результатам сейсморазведки [25; 38; 52; 53].

В конце весны 2020 г. на Бованенковском НГКМ под газодинамическим воздействием произошел взрыв многолетнего бугра пучения (МБП) С17 с мощным выбросом газа [27; 42; 43], в результате которого обнажилась гигантская полость в массиве подземного льда. Ее основание имело эллиптическую форму с ориентацией большой оси в северо-западном направлении по азимуту 350°, что близко к азимутам глубинных разломов, выявленных по данным сейсморазведки в юрско-меловом комплексе (в основном $353 \pm 6^\circ$) [43] и ориентации описанных выше вулканогенных объектов. Соотношение длин осей эллипса 1:4,4 ($K_{\text{э}} = 0,228$) сопоставимо с характеристиками трех объектов на озере Ямбуто ($K_{\text{э}}$ от 0,45 до 0,23). Главным объяснением таких выраженных эллиптических форм основания полости С17 и грязевулканических объектов озера Ямбуто является приуроченность к дизъюнктивным нарушениям.

По своему генезису выявленные на термокарстовых озерах Лабварто и Ямбуто 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. По данным [47] и нашим замерам температура воды в крупных термокарстовых озерах центрального Ямала в летнее время составляет 5—9°C. Кроме того, обычно МБП криогенного типа имеют округлую или слабовыраженную эллиптическую форму, что их кардинально отличает от трех объектов на озере Ямбуто с очень малой величиной $K_{\text{э}}$ и большим эксцентриситетом. Изучаемые объекты имеют все признаки ГВ, и мы не видим никакой другой модели, способной так же убедительно объяснить их генезис.

Весьма возможно, что на дне озера Ямбуто и соседних трех Нейтинских озер (Нейто 1-е, Нейто-Ерто и Нейто-Малто) существуют другие грязевулканические постройки. По данным космоснимка S-2, 19 сентября 2021 г. в центральной части Ямбуто было очень сильное замутнение (его не было 15 и 27 сентября). В тот же день в центральной части озера Нейто 1-е наблюдалось крупное по размерам, но слабое по интенсивности замутнение вокруг выделенного при проведении эхолокации конического поднятия высотой порядка 25 м с диаметром основания около 1 км [47], которое также выделяется по данным ДЗЗ (70,1655° N, 70,7687° E). Не вдаваясь в подробности, отметим, что газопроявления из всех крупных озер в центральной части Ямала требуют дальнейших исследований.

5. Заключение

В последнее десятилетие на полуострове Ямал авторами выполнен большой объем экспедиционных исследований, которые позволили в процессе

широкого комплексирования с данными ДЗЗ из космоса получить принципиально 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 [11; 21—27; 38, 41—43; 45; 46]. Данные ДЗЗ из космоса труднодоступных регионов Арктики, включая северную часть Западной Сибири, предоставляя уникальную возможность ретроспективного анализа обстановки в районах исследуемых объектов с глубиной исследований около 60 лет.

По данным ДЗЗ, на севере Западной Сибири на дне термокарстовых озер, рек и прибрежных зон Карского моря обнаружено свыше 4,5 тысяч зон мощных выбросов газа с формированием кратеров-покмарок. Наибольшей концентрацией объектов с приповерхностной газодинамической активностью характеризуется полуостров Ямал, на котором обнаружено свыше 3 тысяч зон интенсивной дегазации. По сравнению с многолетнемерзлыми породами талики на дне не замерзающих до дна термокарстовых озер, рек и мелководных акваторий Северного Ледовитого океана создают существенно лучшие пути субвертикальной миграции газа и облегчают его эмиссию в гидросферу и атмосферу. Имеются основания считать, что мощные выбросы газа преимущественно происходят из неглубоко залегающих залежей со сверхвысокими (сверхлитостатическими) давлениями [11; 25; 38; 51]. В этих залежах газ может накапливаться за счет миграции из глубинных и/или мелкозалегающих источников, включая диссоциацию криогенных газогидратов, а также благодаря привносу микробиального газа (*in situ*).

Впервые на дне арктических термокарстовых озер обнаружены крупные грязевулканические постройки с явно выраженными кратерами. При мониторинге обстановки по ретроспективным космоснимкам на озерах Открытие, Лабварто и Ямбуто показано наличие периодических выбросов пластовых флюидов, включая газ. По совокупности ряда признаков обнаруженные объекты с высоким уровнем вероятности могут быть отнесены к активным ГВ. Ранее во всем Циркумарктическом регионе столь явные грязевулканические постройки на дне термокарстовых озер были неизвестны. Также отметим, что в настоящее время в дополнение к озерам Открытие, Лабварто и Ямбуто проводятся исследования еще нескольких озер с подобными объектами.

Результаты исследований грязевулканических построек на дне термокарстовых озер полуострова Ямал с учетом ряда ранее открытых ГВ на суше Аляски, Гренландии и Исландии, а также на дне морей Бофорта, Норвежского, Баренцева и Карского [25; 32—34; 37] и проявлений грязевого вулканизма на Севере Западной Сибири [11; 22; 25; 35; 36; 45] позволяют утверждать о широком распространении ГВ в Циркумарктическом мегарегионе.

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

Финансирование. 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).

Благодарность. Авторы выражают признательность Правительству Ямало-Ненецкого автономного округа, ПАО «Газпром», ПАО «НОВАТЭК» и Российскому центру освоения Арктики за долговременную поддержку экспедиционных работ на Ямале.

Литература/References

1. Etiope G. Natural Gas Seepage. The Earth's Hydrocarbon Degassing. [S. l.], Springer, Switzerland, 2015, 203 p. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14601-0>.
2. Etiope G., Ciotoli G., Schwietzke S., Schoell M. Grid-dest maps of geological methane emissions and their isotopic signature. Earth System Science Data, 2019, 11, pp. 1—22. Available at: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1-2019>.
3. Saunio M., Stavert A., Poulter B. et al. The Global Methane Budget 2000—2017. Earth Syst. Sci. Data 2020, 12, pp. 1561—1623. Available at: <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.
4. Biskaborn B. K., Smith S. L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at a global scale. Nature Communications, 2019, 10, 264. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
5. Dean J. F. Old methane and modern climate change. Science, 2020, 367, pp. 846—848.
6. State of the Global Climate 2022. World Meteorological Organization, WMO-No. 1316. Geneva, 2023, 55 p.
7. Анисимов О. А., Зимов С. А., Володин Е. М., Лавров С. А. Эмиссия метана в криолитозоне России и оценка ее воздействия на глобальный климат // Метеорология и гидрология. — 2020. — № 5. — С. 131—143. Anisimov O. A., Zimov S. A., Volodin E. M., Lavrov S. A. Methane emission in the permafrost zone of Russia and assessment of its impact on the global climate. Meteorologiya i gidrologiya, 2020, no. 5, pp. 131—143.
8. 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. Cryosphere Earth, 1998, vol. 4, pp. 42—50. (In Russian).
9. Баду Ю. Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирова-

ние и развитие криогенной толщи. — М.: Науч. мир, 2018. — 232 с.

Badu Yu. B. Cryogenic Strata of Gas-Bearing Structures in Yamal. On the Influence of Gas Deposits on the Formation and Development of Cryogenic Strata. Moscow, Scientific World, 2018, 232 p. (In Russian).

10. Сергиенко В. И., Лобковский Л. И., Семилетов И. П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Докл. Акад. наук. Океанология. — 2012. — Т. 446, № 3. — С. 330—335.

Sergienko V. I., Lobkovsky L. I., Semiletov I. P. et al. The degradation of submarine permafrost and the destruction of hydrates on the shelf of east arctic seas as a potential cause of the Methane Catastrophe: Some results of integrated studies in 2011. Doklady Earth Science, Pleades, 2012, vol. 446, pt. 1, pp. 1132—1137. DOI: 10.1134/S1028334X12080144.

11. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Гор. пром-сть. — 2020, № 1. — С. 97—118.

Bogoyavlensky V. I. Natural and technogenic threats in fossil fuels production in the Earth cryolithosphere. Russ. Min. Ind., 2020, pp. 97—118. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118. (In Russian).

12. King L. H., MacLean B. Pockmarks on the Scotian Shelf. GSA Bull., 1970, 81 (10): pp. 3141—3148. Available at: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1970\)81\[3141:PO TSS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1970)81[3141:PO TSS]2.0.CO;2).

13. Josenhans H. W., King L. H., Fader G. B. A side-scan sonar mosaic of pockmarks on the Scotian Shelf. Canadian J. of Earth Sciences, 1978, 15 (5), pp. 831—840. Available at: <https://doi.org/10.1139/e78-088>.

14. Hovland M. Characteristics of pockmarks in the Norwegian Trench. Marine geology, 1981, 39, iss. 1—2, pp. 103—117. Available at: [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(81\)90030-X](https://doi.org/10.1016/0025-3227(81)90030-X).

15. Nelson C. S., Healy T. R. Pockmark-like structures on the Poverty Bay sea bed — possible evidence for submarine mud volcanism. New Zealand J. of Geology and Geophysics, 1984, vol. 27, no. 2, pp. 225—230. DOI: 10.1080/00288306.1984.10422530.

16. Judd A., Hovland M. Seabed fluid flow — impact on geology, biology and the marine environment. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2007, 400 p.

17. Кругликов Н. М., Кузин И. Л. Выходы глубинного газа на Уренгойском месторождении // Структурная геоморфология и неотектоника Западной Сибири в связи с нефтегазоносностью. — Тр. ЗапСибНИГНИ [Тюмень]. — 1973. — Вып. 3. — С. 96—106.

Kruglikov N. M., Kuzin I. L. Outcrops of deep gas at the Urengoy'skoye field. Structural geomorphology and neotectonics of Western Siberia in connection with oil and gas potential. Proc. ZapSibNIGNI, 1973, iss. 3, pp. 96—106. (In Russian).

18. Somoza L., Medialdea T., León R., Ercilla G. et al. Structure of mud volcano systems and pockmarks in the region of the Ceuta Contourite Depositional System (Western Alborán Sea). *Marine Geology*, 2012, vol. 332—334, pp. 4—26. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.06.002>.
19. Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M. et al. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. *Science*, 2017, 356, 18 p. DOI: 10.1126/science.aal4500.
20. Tasianias A., Bunz S., Bellwald B., Hammer O., Planke S. et al. High-resolution 3D seismic study of pockmarks and shallow fluid flow systems at the Snøhvit hydrocarbon field in the SW Barents Sea. *Marine Geology*, 2018, vol. 403, pp. 247—261. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.06.012>.
21. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования выбросов газа на термокарстовых озерах // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 2 (34). — С. 31—47.
- Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N., Nikonov R. A., Sizov O. S. Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the thermokarst lakes gas eruption. *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 2 (34), pp. 31—47. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47. (In Russian).
22. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — С. 52—68.
- Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kargina T. N. Earth Degassing in the Arctic: Comprehensive Studies of the Distribution of Frost Mounds and Thermokarst Lakes with Gas Blowout Craters on the Yamal Peninsula. *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 4 (36), pp. 52—68. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68. (In Russian).
23. 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. A. Earth degassing in the Arctic: the genesis of natural and anthropogenic methane emissions. *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 3 (39), pp. 6—22. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-6-22. (In Russian).
24. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Никонов Р. А., Богоявленский И. В. Мониторинг изменений концентрации метана в атмосфере Арктики в 2019—2021 гг. по данным спектрометра TROPOMI // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12, № 3. — С. 304—319.
- Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V. Monitoring of the methane concentration changes in the Arctic atmosphere in 2019—2021 according to the TROPOMI spectrometer data. *Arctic: Ecology and Economy*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 304—319. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-3-304-319. (In Russian).
25. Богоявленский В. И. Новые данные о грязевом вулканизме в Арктике на полуострове Ямал // Докл. РАН. Науки о Земле, Вулканология. — 2023. — Т. 512, № 1. — С. 92—99. — DOI: 10.31857/S2686739723601084.
- Bogoyavlensky V. I. New Data on Mud Volcanism in the Arctic on the Yamal Peninsula. *Doklady Earth Sciences*, 2023. Vol. 512, Part 1, pp. 847—853. DOI: 10.1134/S1028334X23601116.
26. 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, p. 5345. Available at: <https://doi.org/10.3390/en14175345>.
27. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al. 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>.
28. 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.
- GOST R (Russian State Standard) No. 57123-20 (ISO 19901-2:2004): Petroleum and Natural Gas Industry. Offshore Oil and Gas Field Structures. Design under Seismic Conditions. Moscow, Standartinform, 2016, 32 p. (In Russian).
29. Алиев Ад. А., Гулиев И. С., Дадашев Ф. Г., Рахманов Р. Р. Атлас грязевых вулканов мира. — [Б. м.]: Nafta-Press, 2015. — 323 с.
- Aliyev Ad. A., Guliyev I. S., Dadashev F. G., Rakhmanov R. R. Atlas of mud volcanoes of the world. [S. l.], Nafta-Press, 2015, 323 p. (In Russian).
30. 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.
- Yusubov N. P., Guliyev I. S. Mud Volcanism and Hydrocarbon Systems of South Caspian Basin. According to Geophysical and Geochemical Researches. Baku, Elm, 2022. (In Russian).
31. Kopf A. J. Significance of mud volcanism. *Rev. of Geophysics*, 2002, 40, 02, p. 1005. DOI: 10.1029/2000RG000093.
32. 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, Scot-

- land, 2011, 16 p. Available at: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70156455>.
33. 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, pp. 3160—3181. Available at: <https://doi.org/10.1002/2015GC005928>.
34. Vogt P. R., Cherkashev G., Ginsburg G., Ivanov G. et al. Naakon Mosby Mud Volcano provides unusual example of venting. *EOS*, 1997, vol. 78, no. 48, pp. 556—557. Available at: <https://doi.org/10.1029/97EO00326>.
35. Нежданов А. А., Новопашин В. Ф., Огибенин В. В. и др. Грязевой вулканизм на севере Западной Сибири // Сб. научных трудов ООО «ТюменНИИгипрогаз»: Геология и геологоразведка 2011 г. — Тюмень: Флат, 2011. — С. 73—79.
- Nezhdanov A. A., Novopashin V. F., Ogibenin V. V. et al. Mud volcanism in the north of Western Siberia. *Sat. scientific papers of TyumenNIIgiprogaz LLC: Geology and exploration 2011*. Tyumen, Flat, 2011, pp. 73—79. (In Russian).
36. 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.
- Epifanov V. A. Explosive craters-funnels and the relevance of studying the role of subsoil degassing in climatic events and landscape transformations of the Quaternary period. *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*, 2018, no. 76, pp. 5—40. (In Russian).
37. Миронюк С. Г., Иванова А. А., Хлебникова О. А. Флюидогенные формы рельефа как индикаторы нефтегазоносности недр шельфа // Тр. VII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)». — Т. 2 (4). — Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2019. — С. 120—125.
- Mironyuk S. G., Ivanova A. A., Khlebnikova O. A. Fluidogenic relief forms as indicators of oil and gas content of the shelf subsoil. *Proc. 7th Int. Sci.-Pract. Conf. Marine Research and Education MARESEDU-2018*. Vol. 2 (4). — Tver, OOO "PoliPRESS", 2019, pp. 120—125. (In Russian).
38. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В. Специфика грязевулканической дегазации Земли с катастрофическими последствиями // Безопасность труда в промышленности. — 2022. — № 12. — С. 20—28.
- Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V. Specificity of Mud Volcanic Degassing of the Earth with Catastrophic Consequences. *Occupational Safety in Industry*, 2022, № 12, pp. 20—28. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-12-20-28. (In Russian).
39. Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.6. Agisoft LLC, 2020, 172 p. Available at: www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf.
40. CORONA: America's first satellite program. Ed. K. C. Ruffner. CIA. Washington, 1995, 362 p.
41. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Технологии дистанционного выявления и мониторинга дегазации Земли в Арктике: полуостров Ямал, озеро Нейто // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 2 (30). — С. 83—93.
- Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Technologies for Remote Detection and Monitoring of the Earth Degassing in the Arctic: Yamal Peninsula, Neito Lake. *Arctic: ecology and economy*, 2018, no. 2 (30), pp. 83—93. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-83-93. (In Russian).
42. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н., Никонов Р. А. Цифровые технологии дистанционного выявления и мониторинга развития бугров пучения и кратеров катастрофических выбросов газа в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 4 (40). — С. 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. *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 4 (40), pp. 90—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-90-105. (In Russian).
43. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н. Катастрофический выброс газа в 2020 г. на полуострове Ямал в Арктике. Результаты комплексного анализа данных аэрокосмического зондирования // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 362—374.
- Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N. Catastrophic gas blowout in 2020 on the Yamal Peninsula in the Arctic. Results of comprehensive analysis of aerospace RS data. *Arctic: Ecology and Economy*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 362—374. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-362-374. (In Russian).
44. Porter C., Morin P., Howat I., Noh M., Bates B., Patterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J. et al. ArcticDEM. *Harv. Dataverse*, 2018, 1. DOI: 10.7910/DVN/ОННУКН.
45. Богоявленский В. И., Ерохин Г. Н., Никонов Р. А. и др. 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.
- Bogoyavlensky V. I., Erokhin G. N., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V., Bryksin V. M. Study of catastrophic gas blowout zones in the Arctic based on passive microseismic monitoring (on the example of Lake Otkrytiye). *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 1 (37), pp. 93—104. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-93-104. (In Russian).
46. Богоявленский В. И., Перекалин С. О., Бойчук В. М. и др. Катастрофа на Кумжинском газоконденсатном месторождении: причины, результаты, пути

- устранения последствий // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 1. — С. 32—46.
- Bogoyavlensky V. I., Perekalin S. O., Boichuk V. M., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N. Kumzhinskoe Gas Condensate Field Disaster: reasons, results and ways of eliminating the consequences. The Arctic: Ecology and Economy, 2017, no. 1 (25), pp. 32—46. (In Russian).
47. Эдельштейн К. К., Алабян А. М., Горин С. Л., Попрядухин А. А. Гидрологические особенности крупнейших озер полуострова Ямал // Тр. Карел. науч. центра РАН. — 2017. — № 10. — С. 3—16.
- Edelshtein K. K., Alabyan A. M., Gorin S. L., Popryadukhin A. A. Hydrological and hydrocenical featuters of the largest lakes of the Yamal Peninsula. Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk, 2017, no. 10, pp. 3—16. Available at: <https://doi.org/10.17076/lim571>.
48. Чувилин Е. М., Перлова Е. В., Баранов Ю. Б. и др. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. — М.: ГЕОС, 2007. — 137 с.
- Chuvilin E. M., Perlova E. V., Baranov Yu. B. et al. Structure and properties of rocks in the permafrost zone of the southern part of the Bovanenkovo gas condensate field. Moscow, GEOS, 2007, 137 p.
49. Романовский Н. Н. Талики в области многолетнемерзлых пород и схема их подразделения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геол. — 1972. — № 1. — С. 23—34.
- Romanovsky N. N. Taliks in the area of permafrost and the scheme of their subdivision. Bull. of Moscow Univ. Series geol., 1972, no. 1, pp. 23—34.
50. Гинсбург Г. Д., Соловьев В. А. Геологические модели газогидратообразования // Литология и полезные ископаемые. — 1990. — № 2. — С. 76—87.
- Ginsburg G. D., Soloviev V. A. Geological models of gas hydrate formation. Lithology and Mineral Resources, 1990, no. 2, pp. 76—87. (In Russian).
51. Холодов В. Н. Термобарические обстановки глубин осадочно-породных бассейнов и их флюидодинамика. Сообщение 2: Сверхвысокие давления и грязевые вулканы // Литология и полезные ископаемые. — 2019. — № 1. — С. 44—59.
- Kholodov V. N. Thermobaric conditions of the depths of sedimentary-rock basins and their fluid dynamics. Message 2. Superhigh pressures and mud volcanoes. Lithology and Mineral Resources, 2019, no. 1, pp. 44—59. (In Russian).
52. Скоробогатов В. А., Строганов Л. В., Копеев В. Д. Геологическое строение и газонефтеносность Ямала. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. — 352 с.
- Skorobogatov V. A., Stroganov L. V., Kopeev V. D. Geological structure and gas and oil potential of Yamal. Moscow, ООО "Nedra-Businesscenter", 2003, 352 p. (In Russian).
53. Харахинов В. В. Нефтегазовая геодинамика Западно-Сибирского осадочного мегабассейна // Геология нефти и газа. — 2019. — № 2. — С. 5—21.
- Kharakhinov V. V. Petroleum geodynamics of the West Siberian sedimentary megabasin. Russian oil and gas geology, 2019, no. 2, pp. 5—21. DOI: 10.31087/0016-7894-2019-2-5-21. (In Russian).

Информация об авторах

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: geo.ecology17@gmail.com.

Никонов Роман Александрович, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

Богоявленский Игорь Васильевич, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

NEW DATA ON INTENSIVE EARTH DEGASSING IN THE ARCTIC IN THE NORTH OF WESTERN SIBERIA: THERMOKARST LAKES WITH GAS BLOWOUT CRATERS AND MUD VOLCANOES

Bogoyavlensky, V. I., Nikonov, R. A., Bogoyavlensky, I. V.

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

The article was received on May 25, 2023

For citing

Bogoyavlensky V. I., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V. New data on intensive Earth degassing in the Arctic in the north of Western Siberia: thermokarst lakes with gas blowout craters and mud volcanoes. *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 353—368. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-353-368. (In Russian).

Abstract

In the last decade, in the north of Western Siberia, the authors carried out a large amount of comprehensive research, which made it possible to obtain fundamentally new information about the gas-dynamic mechanisms of dangerous processes in the Arctic permafrost. According to remote sensing data, at the bottom of thermokarst lakes, rivers and coastal zones of the Kara Sea, more than 4.5 thousand zones of powerful gas blowouts with the formation of craters (pockmark) were found. There are reasons to believe that powerful gas emissions mainly come from shallow deposits with ultrahigh (superlithostatic) pressures. For the first time, large mud volcanic uplifts with pronounced craters have been found at the bottom of the Arctic thermokarst lakes. Based on the monitoring of the ice situation and the water environment on the basis of retrospective satellite images on lakes Otkrytie, Labvarto and Yambuto, the presence of periodic emissions of formation fluids, including gas, is shown. Based on the combination of a number of features, the discovered objects can be classified as active mud volcanoes with a high level of probability. The results of the studies allow us to state that mud volcanism is widespread in the Circum-Arctic megaregion.

Keywords: *Arctic, Western Siberia, Yamal, Earth degassing, thermokarst lakes, taliks, gas blowouts and explosions, mud volcanoes, gas hydrates, Earth remote sensing (ERS).*

Funding. The research was carried out according to the state assignment of the Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences on the topic “Improving the efficiency and environmental safety of the oil and gas resources development in the Arctic and Subarctic zones of the Earth in a changing climate” (No. 122022800264-9).

Acknowledgements. The authors are grateful to the Government of the Yamalo-Nenets Autonomous Area, Gazprom PJSC, NOVATEK PJSC and the Russian Center for the Arctic Development for the long-term support of expeditionary work in Yamal.

Information about the authors

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: geo.ecology17@gmail.com.

Nikonov, Roman Aleksandrovich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

Bogoyavlensky, Igor Vasilievich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

© Bogoyavlensky V. I., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V., 2023