

ДЕГАЗАЦИЯ ЗЕМЛИ В АРКТИКЕ: ДИСТАНЦИОННЫЕ И ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫБРОСОВ ГАЗА НА ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕРАХ

В. И. Богоявленский, И. В. Богоявленский

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН,
ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина
(Москва, Российская Федерация)

Т. Н. Каргина

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

Р. А. Никонов

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН,
ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный
исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

О. С. Сизов

АО «Российские космические системы», ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН,
ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный
исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2019 г.

Впервые доказана большая мощность выбросов газа со дна арктических термокарстовых озер, способных разбить лед толщиной 1–1,5 м, сформировать крупные зоны его деструкции диаметром в десятки метров (по факту до 15–45 м) и разбросать крупные глыбы льда на удалении свыше 50 м от эпицентра взрыва. В зоне существования многолетнемерзлых пород (криосфере) на полуострове Ямал установлены ярко выраженные неоднократные многолетние наземные и подводные (со дна озер и реки Мюдряха) извержения (выбросы) газов, которые можно отнести к криовулканическому типу. Показана связь расположения выявленных озер с признаками сильной эмиссии газа с региональным тектоническим строением и глубинными разломами. Даны рекомендации по повышению безопасности жизнедеятельности человека в Арктике, особенно при освоении ресурсов нефти и газа. Обоснована необходимость расширения исследований с применением комплекса геофизических методов.

Ключевые слова: Арктика, Ямал, термокарстовые озера, дегазация, выброс газа, извержение газа, воспламенение, взрыв газа, кратер, воронки, вулкан, криовулкан, бугор пучения, мониторинг, дистанционное зондирование Земли, ДЗЗ, космоснимки.

Введение

Наблюдаемое на Земле потепление климата и расширение работ по поиску, разведке и разработке месторождений углеводородов (УВ) в Арктике и Мировом океане усилили внимание к проблеме исследования процессов дегазации Земли с ее

прямыми проявлениями в литосфере, гидросфере, криосфере и атмосфере [1—42]. Активизировались экспедиционные исследования на суше и акваториях, все больше стало применяться дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), включающее космо- и азросъемку. Особенно эффективно применение ДЗЗ в труднодоступных и малонаселенных регионах Арктики и Северного Ледовитого океана [2—13; 24; 30].

По данным высокоразрешающей сейсморазведки (ВРС), гидролокаторов бокового обзора (ГЛБО) и другого гидроакустического оборудования на дне акваторий Мирового океана часто выделяются локальные углубления — покмарки (Rockmarks), сформировавшиеся за счет выхода/выброса газа. Над ними нередко наблюдаются выходящие из донных отложений потоки газа — «газовые факелы» / сипы (Gas Flares / Seeps). Эмиссия газа подтверждена на разных акваториях Северного Ледовитого океана, в том числе на крупных участках площадью свыше 1 км² [4; 10; 23; 25].

В районах дегазации в Арктике и многих других регионах (в том числе в Европе и Подмосковье) в зимнее время на льду можно наблюдать вмерзшие пузыри газа, незамерзающие полыньи и «пропарины», диаметр которых на озере Байкал иногда достигает нескольких километров, что хорошо видно из космоса [13; 30]. Исследования в Охотском море доказали усиление интенсивности выходов газа при землетрясениях, связанное с повышением проницаемости субвертикальных трещин и возможными изменениями термобарических условий, приводящими к диссоциации залежей газогидрата [4; 21]. После Крымского землетрясения 1927 г. наблюдались мощные неоднократные извержения газа, который самовоспламенялся и формировал стены огня до 500 м высотой и до 3 км шириной [4; 20]. Объяснение этого феномена — выбросы глубинного газа по разломам и диссоциация залежей газогидратов.

Существование мощной, в том числе взрывной природной и техногенной дегазации Земли доказано на суше Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), включая взрывы бугров пучения (булгуньяхи — пинго и др.), выбросы со дна рек и термокарстовых озер [2—4; 9—12; 15—18; 24 и др.]. Генезис выходящего газа различен, включая биогенный, термогенный и их смеси. Миграция газа идет с больших глубин, в том числе от фундамента, и из верхней части геологического разреза из залежей газа, находящихся в свободном и гидратном состояниях.

Большинство действующих и перспективных объектов нефтегазовой промышленности России расположено в арктических и субарктических условиях с обширным развитием криолитосферы (около двух третей территории страны) и многолетнемерзлых пород (ММП). Верхняя часть геологического разреза с ММП является региональным флюидоупором, способным перенаправлять субвертикальные потоки газа в субгоризонтальном направлении, при этом создаются аномально высокие пластовые давления (АВПД), способствующие прорыву газа к поверхности земли с разрывом сплошности пород в наиболее слабых зонах — крупных реках и термокарстовых озерах, под дном которых развиты разломы и сквозные талики [2—12; 26]. Талики под глубокими непромерзающими до дна озерами и реками выполняют функцию окон дегазации Земли в Арктике. Углубление таликов под действием тепловых

потоков Земли и потепления климата способствует открытию новых путей субвертикальной миграции газа из зоны ММП в гидросферу и атмосферу.

Наличие ММП приносит дополнительные риски жизнедеятельности человека, особенно при поисках, разведке и разработке месторождений нефти и газа, а также при строительстве любого типа сооружений. Особые сложности возникают при бурении и эксплуатации скважин, осложняемых деградацией ММП, субвертикальными перетоками смесей УВ (в первую очередь газа), формированием «природно-техногенных залежей» (термин требует утверждения в ГОСТе) и техногенными выбросами.

Выбросы газа и смесей УВ нередко приводили к аварийным и катастрофическим ситуациям в Арктике [2—10; 19]. В частности, в 1969 и 1970 гг. при бурении поисковых скважин на канадских островах Мелвилл и Кинг-Кристиан (Melville, King Cristian) произошли катастрофические выбросы газа с рекордными по широте (до 78°) техногенными выбросами [35]. На остановку этих мощных фонтанов потребовалось соответственно 16 и 3 месяцев. Неоднократно подобные чрезвычайные ситуации бывали и в АЗРФ на многих месторождениях, включая Губкинское, Бованенковское, Харасавэйское, Ванкорское и Кумжинское [4; 8].

Более десяти лет в Институте проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН ведется комплексное изучение процессов дегазации Земли в гидросферу и атмосферу во всех ее проявлениях, при этом выявляются опасные природные объекты на суше и акваториях Арктики. Все объекты систематизируются и заносятся в соответствующие разделы геоинформационной системы «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО») [4—12]. На рис. 1 показаны основные районы исследований на севере Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО), включая шесть гигантских кратеров выброса газа, получивших в ГИС «АМО» индексы С1, С2, С9, С11 и С12. По наиболее значимым объектам создаются отдельные библиотеки, ведется мониторинг по данным ДЗЗ, включая ретроспективные и новые космические снимки из вертолета и беспилотных летательных аппаратов, а также материалы наземного обследования. Таким образом, созданная ГИС постоянно развивается и совершенствуется.

На севере Западной Сибири, на суше полуострова Ямал и сопредельных территориях обнаружено более 10 гигантских кратеров выброса газа, глубина которых в ряде случаев превышала 50 м. Несколько кратеров расположено вблизи инфраструктуры нефтегазовых промыслов: самый известный кратер (С1) образовался в 3 км от газопровода высокого давления Бованенково — Ухта, а С9 — вблизи железной дороги. При этом разброс кусков мерзлой породы и ледогрунта в различных случаях достигал 300—900 м. Кроме того, на Ямале нами обнаружено 368 озер (см. рис. 1) с многочисленными кратерами выбросов газа на дне. На некоторых озерах видны многие сотни и даже тысячи кратеров.

В 2014 г. мы сформулировали ряд задач, на решение которых были ориентированы наши исследования в Арктике в последующие пять лет. Среди этих задач особо выделяются следующие: «Являются ли воронки (покмарки) суши и акваторий Арктики результатом однократного выброса (выхлопа) газа или периодических (многократных) выхлопов из-за постоянного подтока газа из глубины по “газовым трубам” подобно грязевым вулканам? Какие районы и при каких условиях являются наиболее опасными?» [4, с. 144]. В 2017—2019 гг. были получены крайне важные результаты (включая [7—12]), частично приведенные ниже.

Выбросы газа на реках и термокарстовых озерах севера Западной Сибири

Описания арктических озер с различными формами газопроявлений приведены во многих отечественных и зарубежных работах [15—17]. Впервые на севере Западной Сибири «воронки газового прорыва (воронки взрыва) на дне небольших безымянных озер» в северной части уникального Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) были обнаружены в 1971 г. И. Л. Кузиным [17]. «Они представляют собой конусовидные углубления в дне, окруженные аккумулятивными валиками... за счет выброшенного при взрыве грунта. Размеры воронок по внешнему краю валиков достигают 5—10 м и более. Отобранный из воронок взрыва газ имеет преимущественно азотно-метановый состав с очень низким содержанием тяжелых углеводородов» до 0,06% [15—17].

На Тазовском полуострове на Уренгойской площади воронки взрыва (кратеры — покмарки) были выявлены И. Л. Кузиным на дне семи озер около крупного озера Регинто (рис. 2). Озеро Регинто расположено в 500 м от контура газоносности сеноманской залежи Уренгойского НГКМ (см. рис. 2 и 3) вблизи правого берега реки Нгарка-Табьяха. В 1971—1972 гг. озеро Регинто имело размеры 570×780 м и глубину более 3 м, но, видимо, менее 4—5 м [15; 16]. Анализ изотопного состава углеорода метана и гелия (до 0,005% от объема газа), проведенный во Всероссийском нефтяном научно-исследовательском геологоразведочном институте Э. М. Просоловым, свидетельствует о его поступлении из сеномана и более глубоких (до 3 км) горизонтов [15—17]. При повторных исследованиях дна озера Регинто в 1972 г. выяснилось, что большинство воронок, найденных на мелководье в 1971 г., размыты, а рядом образовались новые.

Отметим, что сеноманская залежь газа на Уренгойском НГКМ была открыта 6 июня 1966 г. поисковой скважиной № 2 (забой 1306 м), а нижележащие залежи УВ были открыты в 1968 г. Уренгой разрабатывается с 1978 г. 25 марта 2019 г. преодолен рубеж накопленной добычи газа 7 трлн м³ (преимущественно из отложений сеномана). На Уренгое пробурено 360 поисково-разведочных скважин, из них

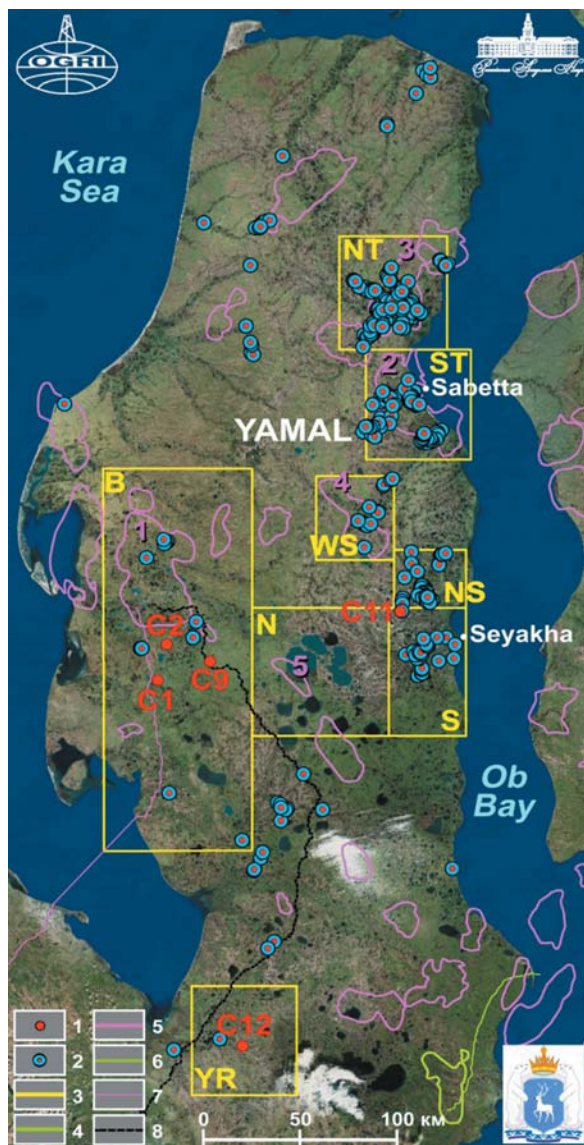


Рис. 1. кратеры выбросов газа на суше и дне озер Ямала. Обозначения: 1 – кратеры выбросов газа C1, C2, C9, C11 и C12; 2 – термокарстовые озера с кратерами выбросов газа; 3 – участки детальных исследований ИПНГ РАН (B – Бованенковский, ST – Южно-Тамбейский, NT – Северо-Тамбейский, N – Нейтинский, S – Сеяхинский, NS – Северо-Сеяхинский, WS – Западно-Сеяхинский, YR – Еркутинский); 4 и 5 – месторождения нефти (4) и газа (5), включая показанные розовым цветом Бованенковское (1), Южно-Тамбейское (2), Северо-Тамбейское (3), Западно-Сеяхинское (4) и Нейтинское (5); 6 – нефтепровод; 7 – газопровод Бованенково – Ухта; 8 – железная дорога. Картографическая основа – ESRI

Fig. 1. Craters of gas blowout onland and lakes bottom of the Yamal. Comments: 1 – Craters of gas blowout C1, C2, C9, C11 and C12; 2 – thermokarst lakes with craters of gas blowout; 3 – sites of the OGRI RAS detailed studies (B – Bovanenkovo, ST – South Tambey, NT – North Tambey, N – Neyto, S – Seyakha, NS – North Seyakha, WS – West Seyakha, YR – Yerkuta); 4 and 5 – oil (4) and gas (5) fields, including shown in pink lines Bovanenkovo (1), South Tambey (2), North-Tambey (3) West-Seyakha (4) and Neyto (5); 6 – oil pipeline; 7 – gas pipeline Bovanenkono – Ukhta; 8 – railroad. Cartographic basis – ESRI

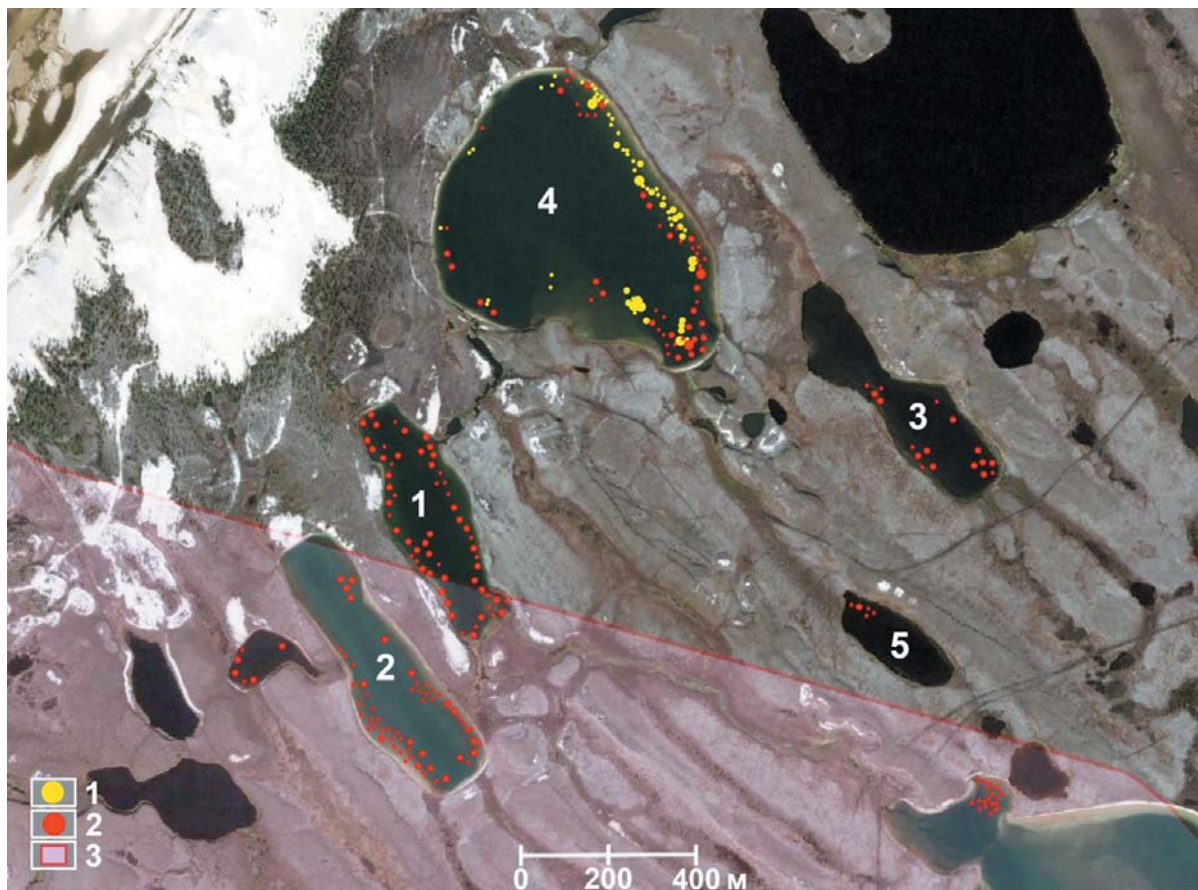


Рис. 2. Расположение воронок выброса газа, выявленных на дне озер в 1971 и 1972 гг. (1 и 2) в районе Уренгойского НГКМ (3). Условные обозначения названий озер: 1 – Первое Длинное, 2 – Второе Длинное, 3 – Третье Длинное, 4 – Регинто, 5 – Дальнее. Картографическая основа – QB 30.08.2006

Fig. 2. The location of gas blowout craters at the bottoms of the lakes in 1971 and 1972 (1 and 2) in the area of Urengoi field (3). Lakes: 1 – the Pervoye Dlinnoye, the Vtoroye Dlinnoye, 3 – the Tretye Dlinnoye, 4 – the Reginto, 5 – the Dalneye. Cartographic basis – QB 30.08.2006

до 1971—1972 гг. — около 80 скважин, в том числе ближайшие три скважины пробурены в 1968 г.: № 39 — в 10 км на юго-запад, № 32 — в 12 км на север, № 45 — в 15 км на северо-запад. Поэтому однозначно утверждать о миграции только по природным каналам (трещинам и разломам) в перечисленные выше озера нельзя. По состоянию на 1971—1972 гг. не исключается техногенная вертикальная миграция газа по заколонному пространству скважин с уходом газа по водоносным горизонтам в сторону данных озер с последующим выходом на поверхность. Кроме того, на ряде скважин Уренгоя случались аварии с мощными выбросами газа.

Для выявления выбросов газа по данным ДЗЗ (аэро- и космоснимки) можно использовать ряд дешифровочных признаков, многие из которых описаны в работах [5—13; 30]. Во время полета над Ямалом нами выявлено озеро с явными признаками сильной дегазации (рис. 3). Пузыри газа, поднимаясь к поверхности воды, сильно меняют альбедо — коэффициенты отражения светового потока (солнечной радиации). «За счет поднятия пузырей газа, имеющих форму сфер, увеличивается альбе-

до — коэффициент отражения светового потока стремится к единице, как для снега» [12]. У нас накопилась масса примеров эффективности данного критерия, однако надежность дешифрирования данных ДЗЗ однозначно увеличивается при комплексном анализе. Поэтому целесообразно продолжить совершенствование технологических приемов дешифрирования.

В данной работе для дистанционного изучения геодинамических изменений на Сеяхинском участке (см. рис. 1, S) использовались различные типы исходных данных ДЗЗ за период 2013—2018 гг., представленные в табл. 1.

На рис. 4 приведен результат мониторинга по данным ДЗЗ из космоса состояния одного из озер, расположенного около северной границы Сеяхинского участка исследований (см. рис. 1, S) и названного нами «Треугольное», по четырем космоснимкам QuickBird (QB), WorldView-2 (WV-2), GeoEye-1 (GE-1) и WV-3 2003—2018 гг. По данным QB 24 августа 2003 г. на дне озера наблюдаются многочисленные покмарки (кратеры) размером до 13 м, что является свидетельством дегазации недр. Несмотря на то что



Рис. 3. Ямальское глубоководное озеро с признаками дегазации (фото В. И. Богоявленского из вертолета 28 августа 2014 г.)
 Fig. 3. Yamal deep-water lake with signs of degassing (photo by V. I. Bogoyavlensky from helicopter 28.08.2014)

Таблица 1. Краткие характеристики использованных данных ДЗЗ

Спутник	Разрешение, м	Источник	Страна
Sentinel-2	10	ESA	ЕС
WorldView-1, 2, 3	0,3— 0,5	Terraserver	США-Канада
QuickBird	2,5	Microsoft	США
GeoEye-1	0,5	Terraserver	США
«Ресурс-П» № 1	0,5—0,6	ГК «Роскосмос»	Россия
«Канопус-В-ИК» №2	2,5	ГК «Роскосмос»	Россия

озеро в западной и северо-западной частях высохло, по рис. 4.1 видна сохранившаяся в кратерах вода. Одной из возможных причин высыхания озера является уход воды по образовавшимся каналам дегазации недр. На последующих снимках WV-2, GE-1 и WV-3 2013—2018 гг. (см. рис. 4.2, 4.3 и 4.4) видно захоронение кратеров отложениями реки Соёлёсё и зарастание северо-восточной зоны выбросов газа прибрежной растительностью.

28 июня 2017 г. на Ямале в русле реки Мюдри-яха (рис. 1, С11) произошли мощный выброс, воспламенение и взрыв газа, очевидцами чего стали представители коренного населения [12]. На месте взрыва образовался гигантский Сеяхинский кратер (С11 в ГИС «АМО») первоначальной глубиной свыше 50 м и диаметром более 100 м (после термоабразии). Землетрясение от взрыва было зарегистриро-

вано сейсмостанциями Единой геофизической службы РАН, установленными весной 2017 г. на Ямале по рекомендациям и при непосредственном участии авторов данной статьи. Благодаря данным ДЗЗ удалось детально восстановить ситуацию до и после взрыва С11 [12], а прямые контакты с коренным населением (М. Н. Окоэтто и др.) позволили оперативно организовать первую экспедицию на С11 через четыре дня после взрыва 2 июля 2017 г. Фактически это позволило доказать природный генезис выброса газа С11. Частые самовоспламенения и взрывы газа и смесей УВ объясняются электростатическим генезисом [12].

Результаты дистанционного и экспедиционного мониторинга состояния ряда кратерных озер, расположенных на широте около 70°, включая озеро Треугольное (см. рис. 4), и образовавшиеся на суше

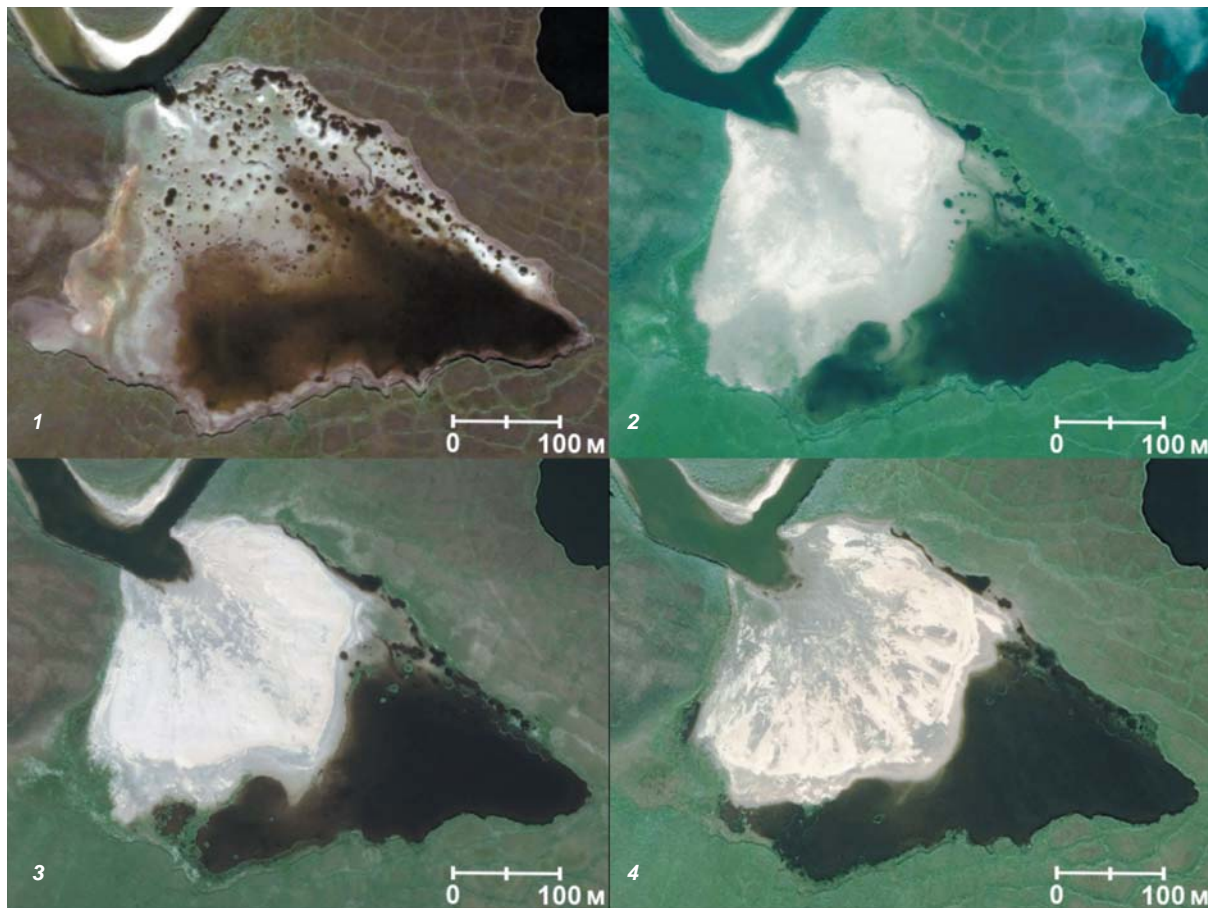


Рис. 4. Космоснимки озера Треугольное с кратерами выбросов газа: 1 – QB 24 августа 2003 г., 2 – WV-2 12 августа 2013 г., 3 – GE-1 15 июля 2016 г. и 4 – WV-3 25 июля 2018 г.
 Fig. 4. Satellite images of Lake Treugolnoye with gas blowout craters: 1 – QB 24.08.2003, 2 – WV-2 12.08.2013, 3 – GE-1 15.07.2016 and 4 – WV-3 25.07.2018

Бованенковские (С1, С2 и С9), Сеяхинский кратер в русле реки Мюдряха (С11) и др., свидетельствуют о необходимости проведения оперативных исследований в режиме, близком к реальному времени. Только в этом случае может быть получена полноценная информация и сделаны правильные выводы о природе произошедших выбросов газа.

Новые мощные выбросы газа на Ямале

В середине марта представители коренного населения во время движения на снегоходах обнаружили огромную полынью во льду безымянного озера. Вокруг нее были видны многочисленные крупные глыбы льда и повреждения ледового покрова. М. Н. Окотэтто, представитель коренного населения, с которым мы длительное время поддерживаем тесную связь, предоставил нам видеозапись, примерные направление и удаление от поселка Сеяха (точные координаты объекта не были определены). С использованием трех скриншотов из видеозаписи был составлен панорамный монтаж (рис. 5.1) с видимыми результатами деструкции льда и выброшенными глыбами.

Для поиска озера с полыней было решено использовать доступные данные ДЗЗ. По имеющейся схеме пролета спутников ГК «Роскосмос» было

определено, что 15 марта в данном районе пролетал спутник «Канопус-В-ИК» № 2 (разрешение 2,5 м), запущенный на орбиту 14 июля 2017 г. (один из шести). После официального запроса ГК «Роскосмос» предоставил ИПНГ РАН в течение суток необходимые космоснимки. Анализ космоснимков позволил обнаружить в указанном районе озеро размером по летнему урезу воды 450×500 м (рис. 6.1, синяя линия), которое отличалось от соседних наличием аномального черного пятна округлой формы диаметром около 15 м. Локальные затемнения наблюдаются также вокруг черного пятна в радиусе около 50 м (рис. 6.2). Поскольку у данного озера нет никакого названия и с учетом важности полученных результатов (см. ниже) для удобства повествования мы дали ему условное название «Открытие».

Для пояснения процесса дешифрирования природы выявленного черного пятна (см. рис. 6.2) отметим следующее. На зимних космоснимках в Арктике в оптическом диапазоне частот на заснеженной поверхности земли в ясную солнечную погоду наблюдается множество сочетаний светлых (почти белых) и темных (серых и почти черных) пятен, обусловленных разной степенью освещенности солнечных и теневых сторон отрицательных



Рис. 5. Место выброса газа на льду озера Открытие: панорамный вид с земли (1) и из вертолета (2 и 3) (фото предоставлены М. Н. Окоэтто)

Fig. 5. Gas blowout site on the ice of Lake Otkrytiye: panoramic view from the ground (1) and from helicopter (2 and 3) (photos provided by M. N. Okotetto)

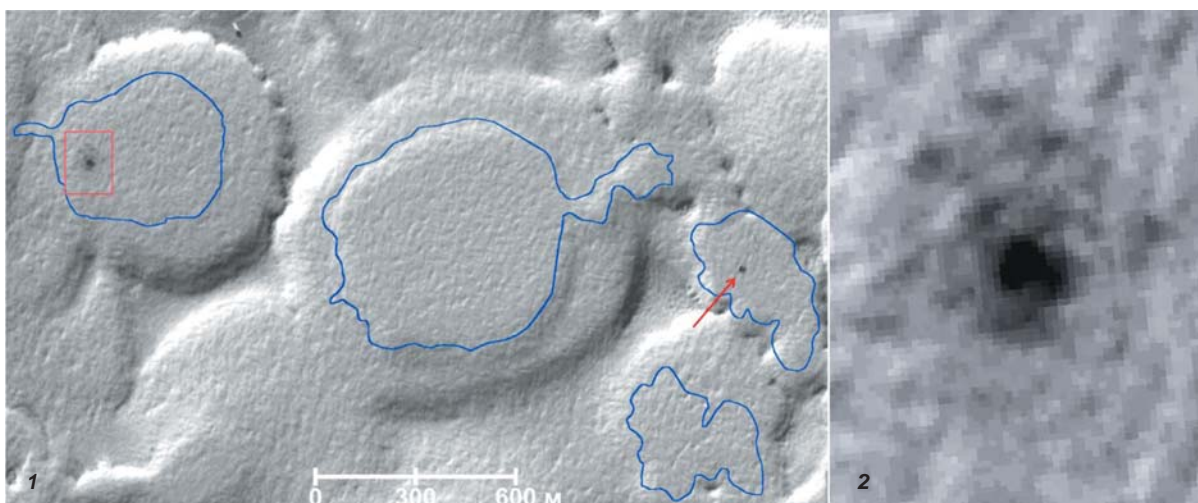


Рис. 6. Космоснимок района выброса газа (1) со спутника «Канопус-В-ИК» 15 марта 2019 г. с увеличенным фрагментом деструкции льда на озере Открытие (2)

Fig. 6. Satellite image of gas blowout area (1) from the Kanopus-V-ИК satellite on 15.03.2019 with enlarged fragment of ice destruction on Lake Otkrytiye (2)

и положительных форм рельефа местности — оврагов, склонов озер, холмов и бугров. В частности, на рис. 6 отрицательная форма рельефа на северных сторонах побережья озер лучше освещена Солнцем (светлая), чем на темных южных (темные). На основе этого эффекта удастся легко идентифицировать бугры (в том числе булгуньяхи), которые отображаются на космоснимках соседствующим сочетанием яркого и темного пятен, обусловлен-

ных соответственно сильным отражением от бугра с солнечной стороны и его теневой стороной, не освещенной прямыми лучами Солнца. На основе отсутствия рядом с черным пятном сопутствующего светлого пятна можно сделать вывод, что выявленный аномальный объект однозначно не связан с локальной впадиной или бугром.

Поверхность Земли, включая сушу и акватории, характеризуется широким спектром изменения аль-

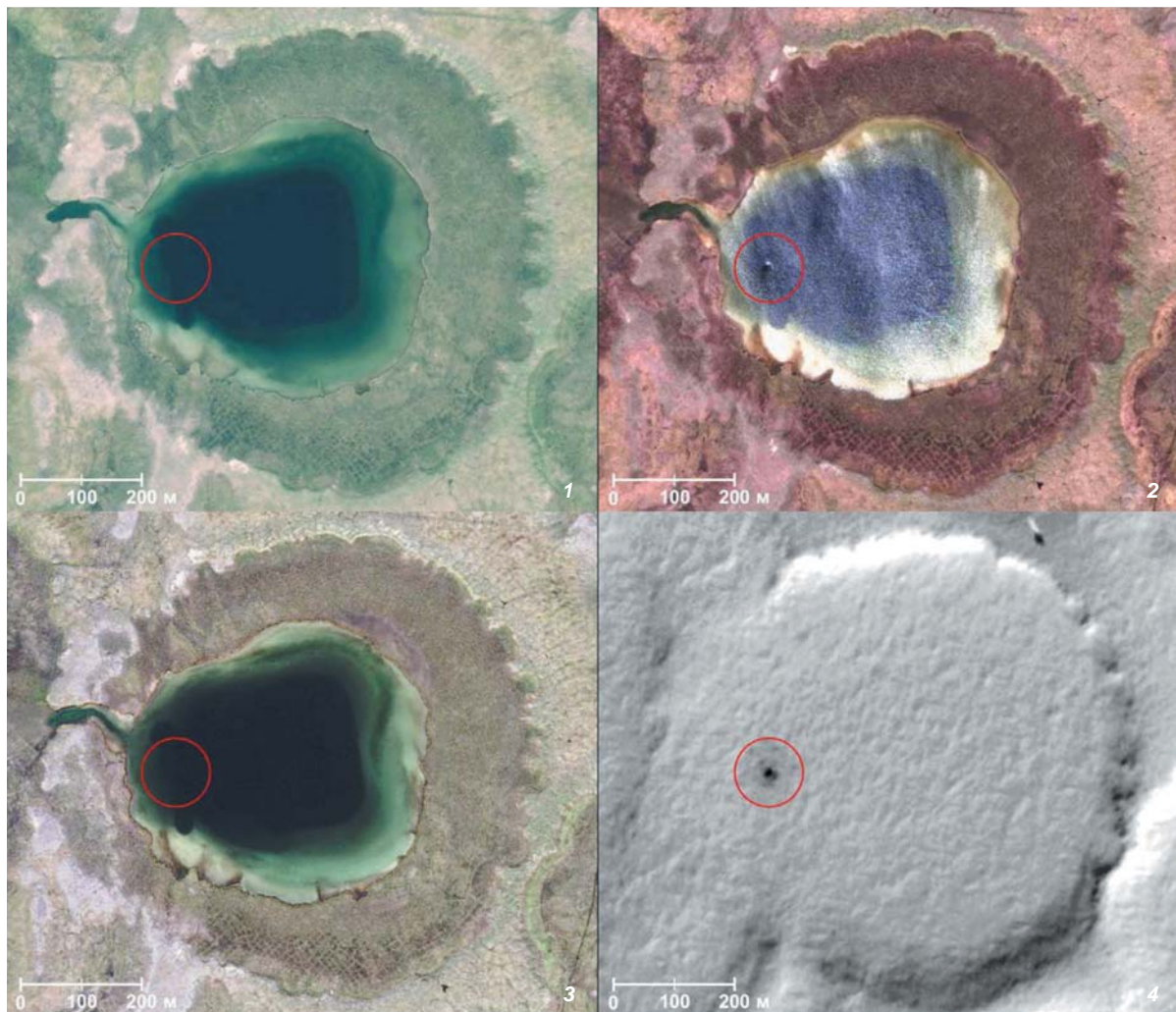


Рис. 7. Космоснимки озера Открытие с положением зоны выброса газа: 1 – WV-2 12 августа 2013 г., 2 – WV-2 13 июля 2018 г., 3 – WV-4 26 августа 2018 г., 4 – «Канопус-В-ИК» 15 марта 2019 г.
 Fig. 7. Satellite images of Lake Otkrytiye with the location of gas blowout zone: 1 – WV-2 12.08.2013, 2 – WV-2 13.07.2018, 3 – WV-4 26.08.2018, 4 – “Kanopus-V-IK” 15.03.2019

беде (А). Для чистого сухого снега А меняется в диапазоне 85—97% (0,85—0,97), а для мокрого (заводненного) снега А резко снижается до 20—30% [31; 40; 41]. Для озерного и морского льда альbedo преимущественно меняется в широком диапазоне 40—60%. Однако для молодого, тонкого (несколько сантиметров), незаснеженного прозрачного льда А может быть даже около 5—20%. Самое низкое А — для спокойной, гладкой водной поверхности в зависимости от уровня Солнца — 2—12% (близко к А угля). При этом 88—98% радиации проникает в воду (поглощается). Малая вероятность наличия на льду озера техногенного объекта или выхода горных пород (А от 10% до 70%) проверена и исключена на основе просмотра ряда разновременных зимних и летних космоснимков. В результате можно сделать вывод, что аномальное черное пятно на космоснимке (см. рис. 6) с наибольшей вероятностью связано с открытой водой — полыней. С меньшей вероятностью можно предположить, что

это полынья, закрытая тонким прозрачным льдом («черный» лед). Таким образом, не вызывает сомнений, что аномальное черное пятно — полынья.

В 2018 г. озеро Открытие было занесено нами в ГИС «АМО» на основе обнаружения на космоснимке WV-4 26 августа 2018 г. в его западной части четырех выстроившихся в линию крупных (диаметром до 40—50 м) подводных объектов, подобных кратерам/покмаркам (рис. 7). На всех четырех снимках рис. 7 красной окружностью показана зона деструкции льда с радиусом около 55 м, определенным по космоснимку «Канопус-В-ИК» 15 марта 2019 г. (см. рис. 7.4). Кроме того, на дне в других частях этого озера вблизи от берега по тому же космоснимку WV-4 были обнаружены еще четыре небольших покмарки диаметром до 4—6 м, а на соседнем озере, расположенном в 250 м к западу, также выявлены 20 небольших покмарок диаметром до 4 м. Отметим, что на снимке WV-2 13 июля 2018 г. на воде точно в центре окружности видна неоднородность,

идентифицированная нами как зона формирования бугра на поверхности воды от поднимающихся пузырей газа (других вариантов нет).

Особо важно, что положение черного пятна со спутника «Канопус-В-ИК» совпало с одним из четырех крупных подводных объектов (см. рис. 7.1 и 7.3), что позволило предположить, что в данном месте произошел новый (повторный) мощный выброс газа, разбивший толстый (1—1,5 м) лед и раскидавший его куски вокруг крупной полыньи. 26 марта мы написали письмо на имя генерального директора ГК «Роскосмос» с благодарностью за оперативное предоставление космоснимков.

Через несколько дней для верификации координат выявленного по данным ДЗЗ объекта по нашей просьбе М. Н. Окотэтто организовал съемку из вертолета. В итоге было подтверждено существование зоны выброса газа с выброшенными кусками льда и замерзшей полыньей с ровной поверхностью (см. рис. 5.2 и 5.3). Отметим, что по данным Gismeteo [32] 14—31 марта средняя температура днем и вечером составляла 7,7°C и 8,6°C (ночью еще холоднее), что способствовало быстрому замерзанию полыньи. На рис. 5.3 видно, что вся зона взрыва запылена снегом, однако несколько крупных глыб льда вокруг замерзшей полыньи выделяются по форме и голубому цвету.

Интересен факт образования продольных снежных гряд в двух почти ортогональных направлениях, наблюдаемых на рис. 5.3. Их формирование, видимо, обусловлено преобладающими направлениями ветра, который, встречая препятствия в виде глыб выброшенного льда, формирует продольные гряды

снежных заносов. По данным Gismeteo [32] роза ветров в течение 18 дней с 14—31 марта днем и вечером характеризовалась следующим образом: южный ветер — 9 дней (50,0%), юго-западный — 4 (22,2%), северо-западный — 1 (5,56%), западный — 3 (16,67%) и восточный — 1 день (5,56%). Таким образом, преобладали два основных ветровых вектора: южный (61,1%) и западный (22,2%). Южный ветер был самым сильным — четыре дня его скорость превышала 9—12 м/с (32,4—42 км/ч). По 12-балльной шкале Бофорта такой ветер характеризуется как свежий и сильный (5 и 6 баллов).

Днем 14—31 марта в регионе стояла преимущественно пасмурная и облачная погода, только три дня (включая 15 марта во время съемки «Канопус-В-ИК») она была ясной (16,6%) и два дня малооблачной (11,1%). Очевидно, что сделать в таких условиях хороший снимок — большая удача. Кроме того, в связи с низкой востребованностью зимних снимков суши АЗРФ постоянная съемка (каждый пролет) не делается. Проведенные исследования показали однозначную необходимость более частой съемки.

Регулярная съемка исследуемого региона обеспечивается европейским спутником Sentinel-2 (S-2), выведенным на орбиту 23 июня 2015 г. На рис. 8 приведена серия космоснимков S-2 озера Открытие в период 2016—2019 гг. Несмотря на то что их разрешение составляет 10 м, на снимке 9 марта 2019 г. на месте выброса газа наблюдается черный объект, 6 марта его нет, а 7 марта он виден слабо. Таким образом, дату выброса газа можно фиксировать в период 7—9 марта, причем, судя по всему, выбросы были с нарастающей силой в две или более стадий.

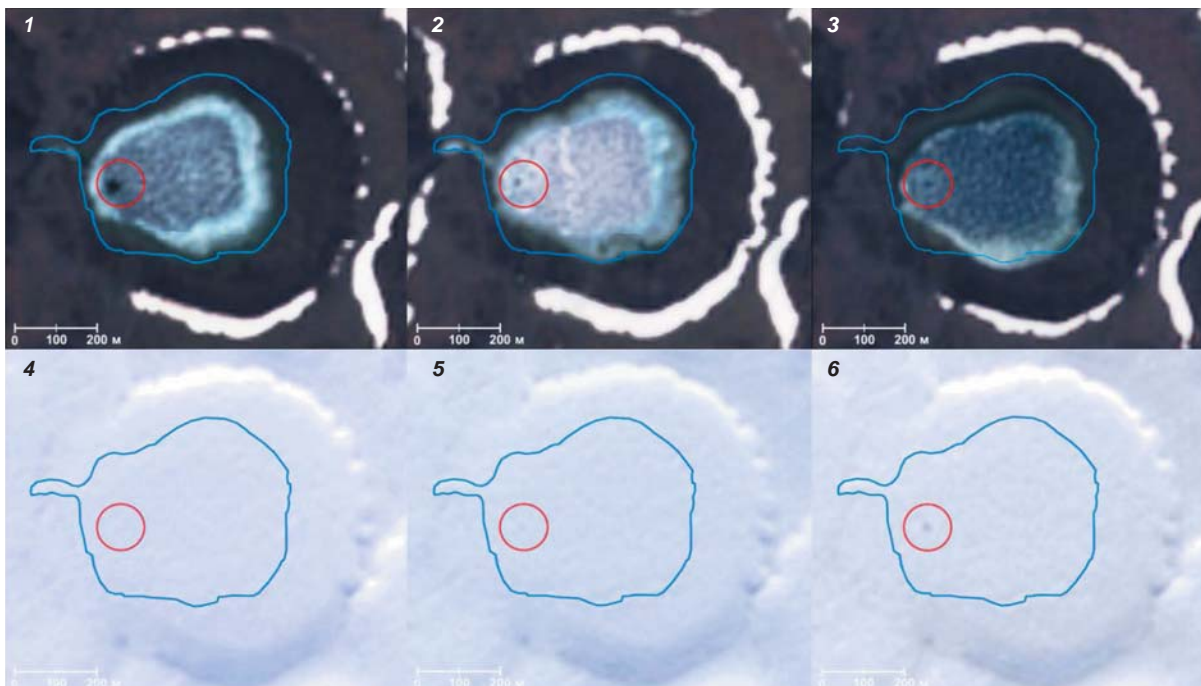


Рис. 8. Результаты мониторинга состояния озера Открытие по космоснимкам S-2: 14 июня 2016 г. (1), 19 июня 2017 г. (2), 22 июня 2018 г. (3), 6, 7 и 9 марта 2019 г. (4, 5 и 6)

Fig. 8. Monitoring results of Lake Otkrytiye state based on satellite images from Sentinel-2: 14.06.2016 (1), 19.06.2017 (2), 22.06.2018 (3), 6, 7 and 9th of March 2019 (4, 5 and 6)

В период 9 марта — 7 апреля снимки S-2 сделаны в облачную погоду (непригодны), но 8 апреля видно, что черный объект пропал. Это соответствует наблюдению из вертолета замерзшей полыньи, занесенной снегом (см. рис. 5.2 и 5.3). Особенно интересно, что на снимках S-2 во время таяния льда, сделанных в июне 2016, 2017 и 2018 гг. (см. рис. 8.1, 8.2 и 8.3), примерно на том же месте наблюдаются неоднородности (пробоины) во льду. В связи с этим можно утверждать, что выбросы газа на озере Открытие происходили многократно и ежегодно в 2016—2019 гг. Судя по наличию четырех кратеров в 2013 г. на снимке WV-2 (см. рис. 7.1), выбросы в озере Открытие идут более семи лет.

Отметим, что подобные черные пятна были выявлены нами ранее на ряде космоснимков в оптическом и радиолокационном диапазонах частот, сделанных преимущественно в конце зимнего сезона (май-июнь) [7—12]. При анализе космоснимка WV-2 2 мая 2016 г. места катастрофы на Кумжинском НГКМ обнаружено, что над затопленными кратерами «...наблюдаются несколько групп трещин во льду веерной (радиальной) формы, сформировавшихся за счет сейсмических ударов при пневматических выхлопах газа со дна кратера... Над всеми кратерами на льду выделяются темные пятна диаметром до 10 м, соответствующие разрушенными выхлопами газа зонам льда (пробоинам) и проталинам» [8]. Аналогичная ситуация наблюдается здесь и на космоснимке WV-2 4 июня 2017 г. Такие же черные пятна обнаружены нами на месте взрыва Сеяхинского кратера С11 на космоснимке «Ресурс-П» 2 мая 2017 г.: «на фоне снежно-ледового покрова видны три черных объекта, весьма вероятно, образовавшиеся за счет протаивания от выходящего газа (сипы) или пробоев мощными струями газа» [12, с. 97]. В итоге ряда наших и зарубежных исследований было отмечено, что наличие неоднородностей в снежно-ледовом покрове водоемов является одним из характерных признаков дегазации со дна озер [5—13; 28; 30; 31; 34; 36; 37; 42].

Принципиально новым результатом исследований дегазации на озере Открытие является то, что комплексные исследования данных ДЗЗ из космоса,

дополненные верификацией детальными снимками места выброса газа с земли и из вертолета, впервые доказали его огромную мощность. Доказано, что выбросы газа способны разбить даже в пиковый зимний месяц (март) лед толщиной 1—1,5 м, сформировать полынью диаметром около 15 м и разбросать глыбы льда на удалении свыше 50 м.

Ближайшие к озеру Открытие нефтегазописковые Сеяхинские скважины № 1, 2 и 4 (забой 2500—3300 м) расположены на больших удалениях в 24,5—26,3 км севернее и северо-восточнее, а ближайшее Арктическое месторождение — в 54 км к юго-западу. В связи с этим техногенный приток газа из этих зон маловероятен. Таким образом, с высоким уровнем вероятности можно утверждать о природном характере газопроявлений в озере Открытие.

Анализ всей площади полосы космоснимков спутника «Канопус-В-ИК» от 15 марта 2019 г. на Сеяхинском участке (ширина полосы съемки около 24 км) позволил выделить подобные черные пятна различных размеров (максимальный диаметр до 45 м) на 154 других озерах, включая кратерный водоем в русле реки Мюдрияха (С11). В частности, одно из дополнительных черных пятен видно на небольшом озере к востоку от озера Открытие (см. рис. 6.1, красная стрелка). Общая площадь обследования составила 1400 км², а плотность размещения озер с признаками выброса газа — 11 озер на 100 км².

На рис. 9 приведен восточный фрагмент Сеяхинского участка (см. рис. 1, S), на котором показаны все озера с признаками дегазации из ГИС «АМО», включая 39 озер с кратерами на дне (космоснимки и аэроснимки из вертолетов) и дополнительные 154 озера с пробоями во льду, выявленные на снимке «Канопус-В-ИК» от 15 марта 2019 г. (два из них совпадают с озерами, выделенными по критериям обнаружения кратеров на дне). Большая часть этих озер легла в одну протяженную (ориентация ЮВ-СЗ) и четыре короткие осредняющие группы озер полосы (две ЮЗ-СВ, одна Ю-С и одна примерно З-В).

В ходе планомерных пятилетних работ по данным ДЗЗ (космо- и аэросъемка с вертолетов) по состо-

Таблица 2. Количество озер с кратерами на дне (N) на различных площадях исследований на полуострове Ямал

№	Площадь	N	Доля, %	Количество и ориентация групп озер
1	Северо-Тамбейская (NT)	132	35,87	3: ЮВ-СЗ, ЮЗ-СВ, Ю-С
2	Южно-Тамбейская (ST)	68	18,48	1: ЮЗ-СВ
3	Западно-Сеяхинская (WS)	15	4,08	2: ЮВ-СЗ и ЮЗ-СВ
4	Северо-Сеяхинская (NS)	57	15,49	2: ЮВ-СЗ и ЮЗ-СВ
5	Сеяхинская (S)	39	10,6	5: ЮВ-СЗ, 2-ЮЗ-СВ, Ю-С и З-В
6	Другие	57	15,49	—
	Итого	368	100	В основном ЮВ-СЗ и ЮЗ-СВ

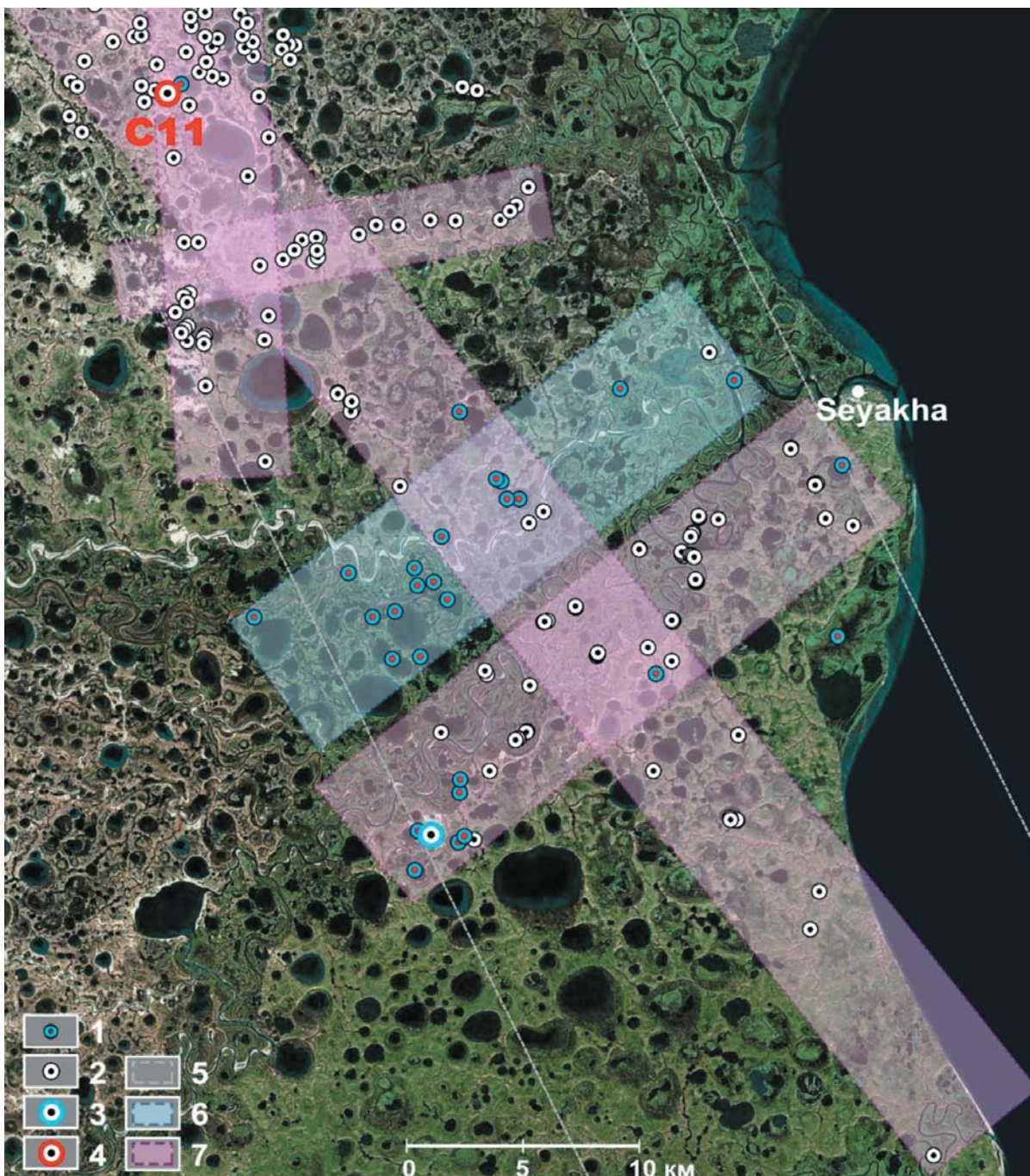


Рис. 9. Расположение озер с признаками дегазации (1, 2) на Сеяхинском участке. Примечания: 1 и 2 – признаки дегазации по кратерам на дне (1) и по пробоинам во льду (2), 3 – озеро Открытие, 4 – Сеяхинский кратер C11, 5 – полоса космосъемки «Канопус-В-ИК» от 15 марта 2019 г., 6 и 7 – основные зоны распространения озер с признаками дегазации (преимущественно) 1 и 2. Картографическая основа – ESRI

Fig. 9. Location of lakes with signs of degassing (1, 2) on the Seyakha plot. Notes: 1 and 2 – signs of degassing by craters at the bottom (1) and by holes in the ice (2), 3 – Lake Otkrytiye, 4 – Seyakha crater C11, 5 – “Kanopus-V-ИК” image footprint dated 15.03.2019, 6 and 7 – main distribution zones of lakes with degassing signs (mostly) 1 and 2. Cartographic basis – ESRI

янию на конец марта 2019 г. на полуострове Ямал выделено 368 озер по критерию обнаружения кратеров выброса газа на дне. Для выполнения этой работы использовались доступные летние космоснимки (см. табл. 1 и др.), из которых, к сожалению, не все были равноценными по качеству отображения изучаемых объектов. По рис. 1 видно, что большая

часть этих озер (311, или 84,5%) сосредоточена на пяти площадях, охарактеризованных в табл. 2. При этом на всех этих площадях наблюдается упорядоченность групп озер по направлениям света, как и на Сеяхинской площади. Отметим, что ряд других озер с признаками эмиссии газа, выделенных по другим критериям (например, голубой цвет воды,

локальные замутнения и др.) [5; 11; 24], не отображен на рис. 1 и не учитывался в статистических расчетах (включая озеро Нейто [5; 11]).

Обсуждение результатов

Судя по данным ДЗЗ, в марте 2019 г. на озере Открытие произошел не однократный выброс (пневматический выхлоп) газа, а его эмиссия (извержение) — в течение нескольких дней. При этом не менее одного раза был мощный пневматический взрыв (возможно, с воспламенением), разбивший лед, расколовший его куски на расстоянии более 50 м и сформировавший полынью диаметром около 15 м.

В региональном плане группы соседних озер в большинстве случаев (84,5%) выстраиваются полосами (линиями). На четырех площадях (Северо-Тамбейской, Западно-Сеяхинской, Северо-Сеяхинской и Сеяхинской) эти полосы пересекаются и формируют кресты. Взаимно перпендикулярная ориентация выделенных полос (ЮВ-СЗ и ЮЗ-СВ) хорошо коррелируется с основными направлениями региональных тектонических элементов (в том числе с Нурминским мегавалом — ЮВ-СЗ) и глубинных разломов. Кроме того, такая же ориентация доминирующих систем субвертикальных трещин была выявлена нами ранее при проведении кольцевого сейсмопрофилирования методом преломленных волн (КСП МПВ) на Русановском НГКМ в Карском море [1]. При этом результаты КСП МПВ были верифицированы физическим моделированием распространения ультразвуковых волн в средах с различной ориентацией систем трещин [1].

Большая часть из 368 озер Ямала с кратерами выбросов газа (63,6%) приурочена к крупным месторождениям, приуроченным к антиклинальным поднятиям. Формирование антиклинальных поднятий и валов нередко сопровождается образованием зон субвертикальной трещиноватости и разломов. Всего на Ямале по данным ДЗЗ по разным критериям выявлено свыше 520 озер с прямыми признаками дегазации Земли (368 озер Ямала с кратерами на дне и 154 озера с пробоинами на льду Сеяхинского участка исследований, включая два по двум критериям).

Наблюдаемые на полуострове Ямал зоны высокоплотного распространения выявленных озер с кратерами выбросов газа без сомнения имеют причинно-следственные связи с высокой газонасыщенностью региона, тектоническим строением, ориентацией и проницаемостью субвертикальных трещин и разломов, а также зонами их наибольшего развития.

Доказанные многократные выбросы газа на озере Открытие из кратера, сформировавшегося в предыдущие годы, свидетельствуют о вулканическом механизме, подтверждавшемся ранее на ряде других объектов нашего мониторинга, включая Антипаутинский и Сеяхинский кратеры (СЗ и С11) [5—12]. Согласно ГОСТ 22.0.03-97 вулкан — «геологическое образование, возникающее над каналами и трещи-

нами в земной коре, по которым на земную поверхность извергаются лава, пепел, горючие газы, пары воды и обломки горных пород», а вулканическое извержение — «период активной деятельности вулкана». Согласно ГОСТ Р 57123-2016 грязевой вулкан — «...геологическое образование, постоянно или периодически извергающее грязевые массы и газы. В местах ранее существовавших разломов могут быть грязевые вулканы». В исследуемых нами случаях мы имеем дело с доказанными периодически извержениями горючих газов (преимущественно метана) и обломков горных пород из криосферы Земли (ММП и ледогрунта). С учетом специфического влияния криосферы в арктических и субарктических условиях происходящие вулканические процессы можно называть криовулканическими, что мы отметили в работе [12, с. 102].

Существование грязевых вулканов с залежами придонных газогидратов в Арктике доказано на норвежской и канадской акваториях Северного Ледовитого океана [4; 29; 38; 39]. В частности, в 1989 г. на континентальном склоне Норвежского моря был обнаружен вулкан Naakon Mosby (широта 72°, глубина моря около 1250 м) [39]. В 1969 г. в море Бофорта в условиях криогидросферы [29] были обнаружены локальные пингоподобные поднятия, часть которых позднее была признана грязевыми вулканами (широта 70,65—70,8°, глубины моря 280—740 м) [38]. ММП в этих зонах отсутствуют, поэтому перечисленные объекты относятся к классическим грязевым вулканам.

Термин «полынья» согласно ГОСТ 19179-73 — «пространство открытой воды в ледяном покрове, образующееся под влиянием динамических и термических факторов», а согласно ГОСТ 58112-2018 — «устойчивое пространство чистой воды среди или на границе неподвижных льдов, которое образуется в результате действия постоянных ветров, течений или подъема теплых вод». Данный термин четко определяет физическую суть полыньи, но в нашем случае ее генезис отличается газозрывным (пневматическим и/или с воспламенением) механизмом образования.

Очередной раз, изучая проблемы природных и техногенных выбросов газа в арктических и субарктических регионах, видим необходимость развития терминологии, утвержденной ГОСТами.

Заключение

1. Впервые доказано, что эмиссия газа со дна арктических водоемов (озера и реки) может обладать столь большой мощностью, что способна разбить лед толщиной 1—1,5 м, сформировать крупные зоны его деструкции диаметром в десятки метров (доказано до 15—45 м) и разбросать крупные глыбы льда на удаления свыше 50 м от эпицентра взрыва.

2. В результате мониторинга с применением данных ДЗЗ на озере Открытие установлены ярко выраженные многолетние подводные вулканиче-

ские извержения газов (возможно, с подземными водами). В связи с криогенной спецификой среды (многолетнемерзлые породы), из которой происходят вулканические извержения газа, их можно отнести к криовулканическому типу [12], а сами вулканы — к криовулканам.

3. Многочисленные термокарстовые озера на Ямале (368), выделенные по данным аэрокосмических наблюдений по критериям обнаружения кратеров на дне, в региональном плане на данном уровне исследования концентрируются преимущественно (84,5%) в пяти зонах восточной части полуострова Ямал и хорошо аппроксимируются полосами, которые во многих случаях пересекаются под углами, близкими к 90°. Это свидетельствует о связи процесса дегазации озер с региональным тектоническим строением и ориентацией глубинных разломов. Большинство этих озер (63,6%) приурочено к крупным месторождениям.

4. Для выяснения генезиса газа и путей его миграции на выявленных озерах с кратерами на дне и пробойнами во льду (включая Открытие) необходима постановка экспедиционных исследований с взятием проб газа и применением комплекса геофизических методов, включая ГЛБО, эхолотирование, георадарную съемку, высокоразрешающую сейсморазведку с активными и пассивными (микросейсмическими) источниками упругих колебаний.

5. С учетом ряда исследованных объектов выбросов газа в Арктике и накопленных за пятилетний период (2014—2019 гг.) знаний отметим, что первоочередными объектами исследований являются взрывоопасные объекты, к которым относятся бугры пучения (в том числе булгуньяхи — *pingo*) и зоны аномального уменьшения мощности многолетнемерзлых пород с таликами на дне термокарстовых озер и рек, особенно приуроченные к участкам существования субвертикальных разломов над залежами газа. Очевидно, что в Арктике такие объекты и зоны имеют очень широкое распространение, поэтому следует сосредоточиться на районах активной жизнедеятельности, особенно разрабатываемых или предстоящих для освоения месторождений углеводородов.

6. Полученные новые результаты подтверждают правильность сделанных нами ранее (в 2014 г.) рекомендаций, направленных на повышение безопасности жизнедеятельности человека в Арктике, особенно при освоении ресурсов нефти и газа [4, с. 144]: «При размещении нефтегазовых промыслов, трубопроводов и населенных пунктов в районах возможного образования воронок (покмарок) рекомендуется проведение перманентных сейсмологических исследований на локальном уровне с установкой не менее трех сейсмостанций. Кроме того, необходим мониторинг состояния криолитозоны с выявлением существующих и зарождающихся потенциально опасных объектов (бугры пучения, включая булгуньяхи — *pingo* и др.) возможных мощных выбросов подземного газа (газовые карманы) с применением

комплекса геофизических методов, включая ВРС и электроразведку».

Работа выполнена по государственному заданию по теме «Рациональное природопользование и эффективное освоение нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли» (№ АААА-А19-119021590079-6) при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований в рамках проекта № 18-05-70106.

Авторы благодарят: Правительство Ямало-Ненецкого автономного округа за постоянную поддержку научных работ в Арктике; ГК «Роскосмос» за долговременное и оперативное обеспечение данными ДЗЗ с отечественных спутников; представителей коренного населения Ямала и особенно М. Н. Око-тэтто за предоставление важной информации и содействие исследованиям.

Литература/References

1. Богоявленский В. И., Урупов А. К., Будагова Т. А., Добрынин С. В. Анизотропные свойства осадочного чехла континентального шельфа // Газ. пром-сть. — 1997. — № 7. — С. 16—18.
Bogoyavlensky V. I., Urupov A. K., Budagova T. A., Dobrynin S. V. Anizotropnye svoystva osadochnogo chekhla kontinental'nogo shel'fa. [Anisotropic features of continental shelf sedimental cover]. Gaz. prom-st', 1997, no. 7, pp. 16—18 (In Russian).
2. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // Бурение и нефть. — 2014. — № 9. — С. 13—18.
Bogoyavlensky V. I. Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. Voronki Yamala i Taimyra. [The threat of catastrophic gas blowouts form the Arctic permafrost]. Burenie i neft', 2014, no. 9, pp. 13—18. (In Russian).
3. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. — Ч. 2 // Бурение и нефть. — 2014. — № 10. — С. 4—8.
Bogoyavlensky V. I. Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. Voronki Yamala i Taimyra. Ch. 2. [The threat of catastrophic gas blowouts form the Arctic permafrost. Pt. 2]. Burenie i neft', 2014, no. 10, pp. 4—8. (In Russian).
4. Богоявленский В. И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов: Монография // Тр. Вольного экон. о-ва России. — 2014. — Т. 182, № 3. — С. 12—175.
Bogoyavlensky V. I. Arktika i Mirovoi okean: sovremennoe sostoyanie, perspektivy i problemy osvoeniya resursov uglevodorodov. Monografiya. [Arctic and the World Ocean: current state, perspectives and challenges of hydrocarbon production. Monograph]. Tr. Vol'nogo ekon. o-va Rossii, 2014, vol. 182, no. 3, pp. 12—175. (In Russian).

5. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Дистанционное выявление участков поверхностных газопроявлений и газовых выбросов в Арктике: полуостров Ямал // Арктика: экология, экономика. — 2016. — № 3 (23). — С. 4—13. Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Distantcionnoe vyyavlenie uchastkov poverkhnostnykh gazoprojavlenii i gazovykh vybrosov v Arktike: poluostrov Yamal. [Remote detection of near surface gas shows and blowouts in the Arctic: Yamal peninsula]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2016, no. 3 (23), pp. 4—13. (In Russian).
6. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений нефти и газа в Арктике // Сборник докладов конференции «Достижения науки как основа научно-технического прогресса в устойчивом перспективном развитии газовой отрасли» // Ноосфера. — 2016. — № 1. — С. 48—67. Bogoyavlensky V. I. Prirodnye i tekhnogennye ugrozy pri osvoenii mestorozhdenii nefiti i gaza v Arktike. [Natural and man-made threats during the development of oil and gas fields in the Arctic]. Sb. dokl. konferentsii "Dostizheniya nauki kak osnova nauchno-tekhnicheskogo progressa v ustoichivom perspektivnom razvitii gazovoi otrasli". Noosfera, 2016, no. 1, pp. 48—67. (In Russian).
7. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Результаты аэрокосмических и экспедиционных исследований крупных выбросов газа на Ямале в районе Бованенковского месторождения // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3 (27). — С. 4—17. — DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-4-17. Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Rezul'taty aerokosmicheskikh i ekspeditsionnykh issledovaniy krupnykh vybrosov gaza na Yamale v raione Bovanenkovskogo mestorozhdeniya. [Results of aerial, space and field investigations of large gas blowouts near Bovanenkovo field on Yamal peninsula]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2017, no. 3 (27), pp. 4—17. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-4-17. (In Russian).
8. Богоявленский В. И., Бойчук В. М., Перекалин С. О. и др. Катастрофа Кумжи // Бурение и нефть. — 2017. — № 1. — С. 18—24. Bogoyavlensky V. I., Boichuk V. M., Perekalin S. O., Bogoyavlensky V. I., Kargina T. N. Katastrofa Kumzhi. [Disaster Kumzhi]. Burenie i nef't', 2017, no. 1, pp. 18—24. (In Russian).
9. Богоявленский В. И. Газогидродинамика в кратерах выброса газа в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 1 (29). — С. 48—55. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55. Bogoyavlensky V. I. Gazogidrodinamika v kraterakh vybrosa gaza v Arktike. [Gas-hydrodynamics in the Arctic craters of gas blowout]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2018, no. 1 (29), pp. 48—55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55. (In Russian).
10. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В. Природные и техногенные угрозы при поиске, разведке и разработке месторождений углеводородов в Арктике // Минер. ресурсы России. Экономика и управление. — 2018. — № 2. — С. 60—70. Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V. Prirodnye i tekhnogennye ugrozy pri poiske, razvedke i razrabotke mestorozhdenii uglevodorodov v Arktike // Miner. resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie. — 2018. — № 2. — С. 60—70.
11. 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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-83-93. Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Tekhnologii distantcionnogo vyyavleniya i monitoringa degazatsii Zemli v Arktike: poluostrov Yamal, ozero Neyto. [Technologies for Remote Detection and Monitoring of the Earth Degassing in the Arctic: Yamal Peninsula, Neito Lake]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2018, no. 2 (30), pp. 83—93. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-83-93. (In Russian).
12. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Мажаров А. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 1 (33). — С. 88—105. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105. Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Mazharov A. V., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kishankov A. V., Kargina T. N. Degazatsiya Zemli v Arktike: distantcionnye i ekspeditsionnye issledovaniya katastroficheskogo Seyakhinskogo vybrosa gaza na poluostrove Yamal. [Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the Seyakha catastrophic gas blowout on the Yamal Peninsula]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2019, no. 1 (33), pp. 88—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105. (In Russian).
13. Бондур В. Г., Кузнецова Т. В. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. — 2015. — № 4. — С. 30—43. — DOI: 10.7868/S020596141504003X. Bondur V. G., Kuznetsova T. V. Vyyavlenie gazovykh sipov v akvatoriyakh arkticheskikh morey s ispol'zovaniem dannykh distantcionnogo zondirovaniya. [Detection of gas seeps in the Arctic offshore areas, using remote sensing data]. Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2015, no. 4, pp. 30—43. DOI: 10.7868/S020596141504003X. (In Russian).
14. Качурин С. П. Термокарст на территории СССР. — М.: АН СССР, 1961. — 263 с. Kachurin S. P. Termokarst na territorii SSSR. [Thermokarst on the territory of USSR]. Moscow, AN SSSR, 1961, 263 p. (In Russian).
15. Кругликов Н. М., Кузин И. Л. Выходы глубинного газа на Уренгойском месторождении // Тр. ЗапСибНИГНИ. — 1973. — Вып. 37. — С. 96—106. Kruglikov N. M., Kuzin I. L. Vykходы glubinnogo gaza na Urengoyском mestorozhdenii. [Gas emissions on

- the Urengoy field]. Tr. ZapSibNIGNI, 1973, vol. 37, pp. 96—106. (In Russian).
16. Кузин И. Л. О природе аномальных озер — показателей углеводородов в глубоких горизонтах осадочного чехла // Проблемы оценки новых зон нефтегазонакопления в основных продуктивных толщах Западной Сибири. — СПб.: ВНИГРИ, 1992. — С. 129—137.
- Kuzin I. L. O prirode anomal'nykh ozer — pokazately uglevodorodov v glubokikh gorizontakh osadochnogo chekhla. [About the nature of blue lakes — the indicators of hydrocarbon accumulations in deep horizons of sedimental cover]. Problemy otsenki novykh zon neftegazonakopleniya v osnovnykh produktivnykh tolshchakh Zapadnoy Sibiri. St. Petersburg, VNIIGRI, 1992, pp. 129—137. (In Russian).
17. Кузин И. Л. О приоритете в изучении поверхностных газопроявлений в Западной Сибири // Геология и геофизика. — 1990. — № 9. — С. 142—144.
- Kuzin I. L. O prioritete v izuchenii poverkhnostnykh gazoproyavleniy d Zapadnoy Sibiri. [About the priority of surface gas shows investigation in West Siberia]. Geologiya nefti i gaza, 1990, no. 9, pp. 142—144 (In Russian).
18. Лейбман М. О., Дворников Ю. А., Хомутов А. В. и др. Водно-химические особенности воды озер и воронок газового выброса, вложенных в морские отложения севера Западной Сибири // Геология морей и океанов: Материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. — Т. 4. — М.: ИО РАН, 2017. — С. 117—121.
- Leibman M. O., Dvornikov Yu. A., Khomutov A. V. et al. Vodno-khimicheskie osobennosti vody ozer i voronok gazovogo vybrosa, vlozhennykh v morskije otlozheniya severa Zapadnoy Sibiri. [Water-chemical features of the water of lakes and funnels of the gas emission, invested in marine deposits of the north of Western Siberia]. Geologiya morei i okeanov: Materialy XXII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii. Vol. 4. Moscow, IO RAN, 2017, pp. 117—121. (In Russian).
19. Мельников В. П., Спесивцев В. И., Куликов В. Н. О струйной дегазации углеводородов как источнике новообразований льда на шельфе Печорского моря // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике: Материалы международной конференции. — Новосибирск: Наука, 1997. — С. 259—269.
- Mel'nikov V. P., Spesivtsev V. I., Kulikov V. N. O struynoy degazatsii uglevodorodov kak istochnike novoobrazovaniy l'da na shel'fe Pechorskogo morya. [On jet degassing of hydrocarbons as a source of ice formation on the shelf of the Pechora Sea]. Itogi fundamental'nykh issledovaniy kriosfery Zemli v Arktike i Subarktike: Materialy mezhdunarodnoy konferentsii. Novosibirsk, Nauka, 1997, pp. 259—269. (In Russian).
20. Никонов А. А. Крымские землетрясения 1927 года: неизвестные явления на море // Природа. — 2002. — № 9. — С. 13—20.
- Nikonov A. A. Krymskiye zemletryasyeniya 1927 goda: neizvestnyye yavleniya na more. [The Crimean earthquakes of 1927: unknown phenomena in the sea]. Priroda, 2002, no. 9, pp. 13—20. (In Russian).
21. Обжиров А. И. Газогидраты и потоки метана в Охотском море // Мор. информ.-управляющие системы. — 2013. — № 1 (2). — С. 56—65.
- Obzhirov A. I. Gazogidraty i potoki metana v Okhotskom more. [Gas hydrates and methane flows in the Sea of Okhotsk]. Mor. inform.-upravlayushchiye sistemy, 2013, no. 1 (2), pp. 56—65. (In Russian).
22. Санников Г. С. Картометрические исследования термокарстовых озер на территории Бованенковского месторождения. Полуостров Ямал // Криосфера Земли. — 2012. — Т. 14, № 2. — С. 30—37.
- Sannikov G. S. Kartometricheskiye issledovaniya termokarstovykh ozyor na territorii Bovanenkovskogo mestorozhdeniya. Poluostrov Yamal. [Cartometric investigations of thermokarst lakes on the territory of Bovanenkono field. Yamal Peninsula]. Kriosfera Zemli, 2012, vol. XIV, no. 2, pp. 30—37. (In Russian).
23. 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. — 2012. — Т. 446, № 3. — С. 330—335.
- Sergiyenko V. I., Lobkovskiy L. I., Semiletov I. P. et al. Degradatsiya podvodnoy merzloty i razrusheniye gidratov shelfa morey Vostochnoy Arktiki kak vozmozhnaya prichina "metanovoy katastrofy": nekotorye rezultaty kompleksnykh issledovaniy 2011 goda. [Underwater permafrost degradation and gas hydrates destruction of East Arctic seas shelf as one of the reasons of "metane catastrophe": some results of 2011 year complex studies]. Dokl. Akad. nauk. 2012, vol. 446, no. 3, pp. 330—335. (In Russian).
24. Сизов О. С. Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // Геоматика. — 2015. — № 1. — С. 53—68.
- Sizov O. S. Distantionnyi analiz posledstviy poverkhnostnykh gazoproyavleniy na severe Zapadnoy Sibiri. [Remote analysis of consequences of surface gas occurrence in the north of Western Siberia]. Geomatika, 2015, no. 1, pp. 53—68. (In Russian).
25. Шахова Н. Е., Сергиенко В. И., Семилетов И. П. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестн. РАН. — 2009. — Т. 79. — С. 507—518.
- Shakhova N. E., Sergiyenko V. I., Semiletov I. P. Vklad Vostochno-Sibirskogo shelfa v sovremennyy tsykl metana. [Contribution of East Siberian shelf to the contemporary methane cycle]. Vestn. RAN, 2009, vol. 79, pp. 507—518. (In Russian)
26. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИГАЗ, 2009. — 192 с.
- Yakushev V. S. Prirodnyi gaz i gazovye gidraty v kriolitozone. [Natural gas and gas hydrates in cryolithic zone]. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (In Russian).
27. Andreassen K., Nilssen E. G., Degaard C. M. Analysis of shallow gas and fluid migration within the Plio-

- Pleistocene sedimentary succession of the SW Barents Sea continental margin using 3D seismic data. *Geo-Marine Letters*. 2007, vol. 27, no. 2, pp. 155—171. DOI: 10.1007/s00367-007-0071-5.
28. Anthony K. M. W., Anthony P., Grosse G., Chanton J. Geologic methane seeps along boundaries of Arctic permafrost thaw and melting glaciers. *Nature Geoscience*, 2012, vol. 5, pp. 419—426. DOI: 10.1038/ngeo1480.
29. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlensky I. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas. *Geosciences*, 2018, 8, 453, 17 p. DOI: 10.3390/geosciences8120453.
30. Bondur V. G., Kuznetsova T. V. Detecting Gas Seeps in Arctic Sea Water Areas Using Remote Sensing Data. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51, no. 9, pp. 1060—1072. DOI: 10.1134/S0001433815090066.
31. Brandt R. E., Surface S. G. Albedo of the Antarctic Sea Ice Zone. *J. of Climate*, 2005, vol. 18, pp. 3606—3622.
32. Gismeteo. Available at: <https://www.gismeteo.ru/diary/236826/2019/3/>.
33. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. Cambridge, 2007, 475 p.
34. Lindgren P. R., Grosse G., Walter Anthony K. M., Meyer F. J. Detection and spatiotemporal analysis of methane ebullition on thermoclast lake ice using high resolution optical aerial imagery. *Biogeosciences*. 2016, no. 13 (1), pp. 27—44. DOI: 10.5194/bg-13-27-2016.
35. Maier L. Killing the King Christian D-18 well, Arctic Islands. *Petroleum History Society Archives*, June 2014, VXXV, no. 4. pp. 5—10.
36. Martinez-Cruz K., Sepulveda-Jauregui A., Walter Anthony K., Thalasso F. Geographic and seasonal variation of dissolved methane and aerobic methane oxidation in laskan lakes. *Biogeosciences*. 2015, 12 (15), pp. 4595—4606. DOI: 10.5194/bg-12-4595-2015.
37. Paltan H., Dash J., Edwards M. A refined mapping of Arctic lakes using Landsat imagery. *Int. J. Remote Sens*, 2015, 36, pp. 5970—5982. DOI: 10.1080/01431161.2015.1110263.
38. Paull C. K., Dallimore S. R., Caress D. W. et al. Active mud volcanoes on the continental slope of the Canadian Beaufort Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16, pp. 3160—3181. DOI: 10.1002/2015GC005928.
39. Sauter E. S., Muyakshin S. I., Charlou J. et al. Methane discharge from a deep-sea submarine mud volcano into the upper water column by gas hydrate-coated methane bubbles. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 243 (3-4), pp. 354—365.
40. Shokr M., Sinha N. Sea Ice. *Physics and Remote Sensing*. [S. l.], Wiley, 2015, 607 p.
41. Snow albedo. Last Updated on Wed, 03 Apr 2019. Available at: <https://www.climate-policy-watcher.org/energy-balance/snow-albedo.html>.
42. Walter Anthony K. M., Vas D. A., Brosius L. et al. Estimating methane emissions from northern lakes using ice bubble surveys. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2010, vol. 8, pp. 592—609. DOI: 10.4319/lom.2010.8.0592.

Информация об авторах

Богоявленский Василий Игоревич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), научный руководитель кафедры геоэкологии, профессор, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: vib@pgc.su.

Богоявленский Игорь Васильевич, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), заведующий лабораторией, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: igorBogoyavlensky@gmail.com.

Каргина Татьяна Николаевна, младший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: tatyana.nik92@gmail.com.

Никонов Роман Александрович, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), инженер, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

Сизов Олег Сергеевич, кандидат географических наук, доцент, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), главный специалист, АО «Российские космические системы» (127490, Москва, ул. Декабристов, вл. 51, стр. 25), e-mail: kabanin@yandex.ru.

Библиографическое описание данной статьи

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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47.

EARTH DEGASSING IN THE ARTIC: REMOTE AND FIELD STUDIES OF THE THERMOKARST LAKES GAS ERUPTION

Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

Kargina T. N.

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

Nikonov R. A.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

Sizov O. S.

“Russian Space Systems”, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on April 4, 2019

The work was carried out according to the state assignment on the theme “Environmental management and efficient development of oil and gas resources in the Arctic and subarctic zones of the Earth” (No. AAAA-A19-119021590079-6) with the support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of project No. 18-05-70106.

The authors thank the Government of the Yamal-Nenets Autonomous District for the continued support of scientific work in the Arctic; SC “Roskosmos” for the long-term and operational provision of remote sensing data; representatives of the indigenous people, and especially M. N. Okotetto for providing important information and assistance.

Abstract

It is proved for the first time that a high power of gas blowout from the bottom of Arctic thermokarst lakes is capable of breaking one-and-a-half-meter-thick ice, forming large ice destruction zones of tens of meters in diameter (in fact up to 15-45 m) and scattering large blocks of ice for distances over 50 m from the epicenter of the explosion. Clearly visible repeated onshore and underwater (from bottoms of lakes and the Myudriyakh River) eruptions (blowout) of gas of cryovolcanic type are detected in the permafrost zone (cryosphere) of the Yamal Peninsula. The connection between the location of lakes with powerful degassing and regional tectonic structures and deep faults is shown. Recommendations are made to improve the safety of human life in the Arctic, especially when developing oil and gas resources. The necessity of expanding research using a complex of geophysical methods is substantiated.

Keywords. The Arctic, Yamal, thermokarst lakes, degassing, gas emission, gas blowout, gas eruption, ignition, gas explosion, crater, funnels, volcano, cryovolcano, frost mound (pingo), monitoring, Earth Remote Sensing, RS, satellite images.

Information about the authors

Bogoyavlensky Vasily Igorevich, Doctor of Engineering Science, Corresponding member of RAS, Deputy Director for Science, Chief Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: vib@pgc.su.

Bogoyavlensky Igor Vasilyevich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Head of Laboratory, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

Kargina Tatiana Nikolayevna, Junior Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: tatyana.nik92@gmail.com.

Nikonov Roman Aleksandrovich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Engineer, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

Sizov Oleg Sergeyevich, PhD of Geography, Chief Expert, “Russian Space Systems” (51-25, Dekabristov St., Moscow, Russia, 127490), Associate Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: kabanin@yandex.ru.

Bibliographic description

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).

© Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N., Nikonov R. A., Sizov O. S., 2019