

ВЗРЫВНАЯ ДЕГАЗАЦИЯ ЗЕМЛИ НА ПОЛУОСТРОВЕ ЯМАЛ И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ АКВАТОРИИ КАРСКОГО МОРЯ

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

Статья поступила в редакцию 18 февраля 2024 г.

Для цитирования

Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Взрывная дегазация Земли на полуострове Ямал и прилегающей акватории Карского моря // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 2. — С. 177—191. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-177-191.

Данные дистанционного зондирования Земли из космоса и с применением БПЛА позволяют решать широкий круг задач, связанных с изучением процессов дегазации Земли в Арктике. Впервые в результате комплексных аэрокосмических исследований на полуострове Ямал на дне 3551 термокарстового озера и 16 рек обнаружены 4992 зоны мощных выбросов (взрывов) газа в виде кратеров (покмарок). Кроме того, в прибрежных зонах Карского моря выявлено еще 669 зон взрывной дегазации, преимущественно в губах, заливах, лиманах и бухтах. С учетом полуострова Югорский и острова Белый всего в регионе исследований найдено 6022 зоны взрывной дегазации. Подтверждены ранее сделанные выводы, что Нейтинско-Сеяхинский и Сабеттинский районы являются наиболее газозрывоопасными. Обосновано, что возможная интенсивная природная дегазация Земли, особенно происходящая в процессе деградации субкавальных многолетнемерзлых пород и диссоциации газогидратов, способна кардинально изменить упруго-прочностные свойства придонного грунта, при этом его насыщение газом может нарушить условия строительства различных объектов, включая подводные газопроводы. Широко распространены на севере Западной Сибири выбросы газа с образованием кратеров на суше и акваториях способны привести к аварийным и даже катастрофическим ситуациям на объектах нефтегазового комплекса и к пожарам в тундре.

Ключевые слова: Ямал, Карское море, взрывная дегазация Земли, пингоподобные поднятия (PLF), кратеры, покмарки, сипы газа, газогидраты, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ).

Введение

Полуостров Ямал с прилегающим шельфом Карского моря является одним из самых нефтегазоперспективных регионов России, в котором уже ведется добыча газа и конденсата на двух уникальных месторождениях — нефтегазоконденсатном (НГКМ) Бованенковском (с 2012 г.) и газоконденсатном (ГКМ) Южно-Тамбейском (с 2017 г.), заложившем основу самого северного производства сжиженного природного газа (СПГ) на заводе в Сабетте, расположенном в тяжелых арктических условиях на 65 км севернее норвежского завода СПГ на острове Мелкоя (Melkøya). Кроме того, в 2014 г. началась добыча нефти на крупном Новопортовском НГКМ.

Влияние глобальных климатических изменений привело к особенно быстрым темпам потепления

в Арктике, в результате чего активизируется деградация многолетнемерзлых пород (ММП), порождающая множественные проблемы и несущая угрозы жизнедеятельности человека, особенно связанной с освоением месторождений углеводородов [1—7]. Среди этих проблем выделим снижение упруго-прочностных свойств ММП с ухудшением их несущей способности, угрожающим возникновением аварийных и даже катастрофических ситуаций из-за дестабилизации строительных объектов, включая трубопроводы и приустьевые зоны скважин. Кроме того, ухудшаются экранирующие свойства ММП на пути субвертикальной миграции газа, активизируются процессы углубления и расширения участков развития таликов в непромерзающих зимой термокарстовых озерах и реках, которые являются относительно хорошими каналами дегазации Земли.

Деградация реликтовых ММП на суше Арктики и дне прилегающей мелководной части шельфа (до изобаты 120 м), происходящая под действием экзогенных и эндогенных процессов, на обширных участках изменяет термобарические условия существования газогидратов, в результате чего при их диссоциации происходят разжижение осадочных отложений верхней части разреза (ВЧР — обычно до 500—900 м) и выделение из газогидратов больших объемов свободного газа (преимущественно метана). Это дополнительно способствует активизации газогидродинамических процессов и увеличению объемов выбросов газа, в том числе в мощной взрывной форме с формированием кратеров как на суше Арктики, так и на дне арктических морей [6—11]. При этом увеличение эмиссии метана и других газов в атмосферу усиливает парниковый эффект, приводящий к потеплению климата [1—3].

Впервые прямые исследования зон выходов газа в Арктике со дна термокарстовых озер были проведены И. Л. Кузиным в 1971—1972 гг. При этом на Уренгойской площади со дна ряда озер наблюдались газопроявления, а на дне озер были обнаружены «...воронки взрыва (газового прорыва). 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%) [10]. Собранные образцы газа были исследованы во Всероссийском нефтяном научно-исследовательском геологоразведочном институте, при этом анализ изотопного состава гелия (до 0,005% объема газа) и углерода метана показал миграцию газа из глубоких (1—3 км) горизонтов [10]. На суше Арктики наиболее благоприятные условия для эмиссии метана в атмосферу существуют в субаквальных условиях термокарстовых озер, крупных речных долин и заболоченных территорий, где переработка углерода и выделение метана *in situ* происходят круглогодично даже при температурах около 0°C [12].

В связи с обнаружением с 2014 по 2024 гг. на суше севера Западной Сибири более 20 гигантских кратеров [4—9] резко расширились исследования различных проявлений дегазации Земли в Арктике, чему способствовало использование технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, с вертолетов и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [13—19]. На основе дешифрирования данных ДЗЗ на севере Западной Сибири (включая полуострова Ямал, Гыдан и Тазовский) площадью около 348 тыс. км² (46,4% территории Ямало-Ненецкого автономного округа) по данным ДЗЗ нами выявлено более 14 тысяч многолетних бугров пучения, в том числе на Ямале их обнаружено более 7,5 тысяч. Некоторые из этих бугров являются потенциально газозрывоопасными, о чем свидетельствуют продолжающиеся мощные взры-

вы (в 2023 г. их было зафиксировано два). Во всех четырех случаях выбросов газа, наблюдавшихся коренным населением, подтверждаются самовоспламенения и взрывы газа, что делает данное явление крайне опасным.

В 2014—2019 гг. на полуострове Ямал нами были обнаружены 415 термокарстовых озер с кратерами выбросов газа (ТОКВГ) на дне и другими газопроявлениями [15—17]. В последующие годы исследования были продолжены на Ямале и расширены на всю территорию севера Западной Сибири, включая полуострова Гыданский и Тазовский с сопредельными мелководными частями Карского моря с Обской и Тазовской губами, а также на полуострове Югорский. В итоге по состоянию на конец декабря 2023 г. количество выявленных зон дегазации увеличилось более чем на порядок и достигло в геoinформационной системе «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО», версия 2023) 5337, в том числе на Ямале — 3901. Проблема изучения ТОКВГ стала привлекать все большее внимание, и в 2024 г. появилась статья [20], в которой достаточно детально рассмотрены три ТОКВГ в трех различных биоклиматических зонах Ямала (включая остров Белый).

Более полувека на акваториях многих морей мира изучаются интенсивные проявления дегазации Земли в виде кратеров выбросов газа на дне, также называемых покмарками (rockmarks), и сипов газа (gas seeps), формирующих на эограммах изображения, названные «факелами» газа (gas flares) [11; 21]. В норвежском секторе Баренцева моря обнаружены зоны широкого распространения гигантских кратеров и сипов газа [11]. Обширные поля сипов газа, покмарки и пингоподобные поднятия PLF (pingo-like-features) также выявлены в российском секторе Баренцева моря вблизи архипелага Земля Франца Иосифа, в Печорском и Карском морях [22—28].

В Печорском и Карском морях при бурении инженерно-геологических скважин АО АМИГЭ неоднократно происходили интенсивные и даже аварийные выбросы газа из залежей в ВЧР (газовые карманы — gas pockets), в том числе в приамальских частях Байдарацкой губы [29—31]. По данным ООО «Газпром геологоразведка», в 1990-х годах при бурении глубоких поисково-разведочных скважин на шельфе Арктики также были неконтролируемые выбросы газа из газовых карманов. В частности, в 1990 г. в Карском море при бурении скважины Ленинградская-2 с бурового судна «Виктор Муравленко» при достижении глубины 200 м произошел выброс газа с формированием кратера и разрушением устья скважины [7].

По данным ООО НТФ «Криос», выбросы газа из зоны ММП многократно случались при бурении мерзлотно-параметрических скважин в центральной части Ямала [31—33]. Множество газовых карманов было вскрыто в зоне ММП на глубинах 20—130 м на Бованенковском НГКМ, при этом в отдельных случаях дебиты газа достигали 10—14 тыс. м³/сут [32]. 17 мая 2015 г. при бурении инженерной сква-

жины ООО «Уренгойбурвод» с буровой установки на базе автомобиля МАЗ ВП-15А с глубины 90 м произошли мощный выброс и возгорание газа (пожар уничтожил буровую установку) [7]. Высота горящего фонтана достигала 15 м, но через четыре часа он самопогасился, что свидетельствует о небольших размерах газового кармана и/или возможном обрушении стенок скважины.

Целью данной работы является выявление зон интенсивной (взрывной) эмиссии газа на полуострове Ямал, сопредельных частях суши и мелководья Карского моря (включая Обскую и Байдарацкую губы) по данным ДЗЗ, а также комплексный анализ особенностей их пространственного распределения с учетом результатов морских геолого-геофизических исследований других авторов [22—30] для снижения природных угроз при освоении ресурсов углеводородов.

Краткая геолого-географическая и экономическая информация

Полуостров Ямал имеет площадь около 120 тыс. км² и обладает огромными ресурсами углеводородов. Здесь открыты уникальные по запасам газа многопластовые месторождения — Бованенковское, Южно-Тамбейское, Северо-Тамбейское, а также Харасавэйское и Крузенштернское, частично находящиеся на шельфе [34]. Кроме того, непосредственно в Карском море открыт ряд уникальных и крупных месторождений, включая Ленинградское и Русановское/Динкова. Многие залежи газа расположены в ВЧР, в том числе свод залежи сеноманского газа Бованенковского НГКМ, расположенный на глубине всего около 520 м ниже уровня моря. На Ямале широко развиты тундровая растительность и огромное количество термокарстовых озер, на дне которых формируются сквозные или несквозные талики, что зависит от размеров и глубины озер.

Полуостров Ямал в юго-западной части ограничен Байдарацкой губой, а вдоль всего восточного побережья — гигантской Обской губой протяженностью около 750 км. Байдарацкая губа представляет собой один из самых крупных заливов Карского моря (протяженность около 180 км), разделяющих юго-западную часть полуострова Ямал и побережье полуострова Югорский (Полярный Урал). В ее пределах особо выделяется залив Мутный, в значительной степени защищенный от открытого моря косой Моррасальские Кошки и крупными островами Литке и Нгонярко. Также отметим, что в западной части Ямала имеется крупный мелководный (до 3 м) залив Шарапов Шар, защищенный от морских волн цепочкой песчаных островов Шараповы Кошки.

Для транспортировки газа с Ямала построены два магистральных газопровода с подводными переходами: «Бованенково — Ухта» (2008—2017 гг.) ПАО «Газпром» через Байдарацкую губу, 4 линии по 71,8 км (общая протяженность 287,2 км, производительность до 115—140 млрд м³ в год); «Газ Ямала» (2021 г.) ПАО «Газпром нефть» через Обскую губу

на полуостров Тазовский (протяженность 58,4 км, производительность 20 млрд м³ в год). Подводный четырехниточный переход через Байдарацкую губу находится между береговыми компрессорными станциями «Байдарацкая» (Ямал) и «Ярынская» (Урал). Глубина залива вдоль газопровода достигает 23 м [35].

Для отгрузки нефти в Обской губе ПАО «Газпром нефть» в 2015 г. был построен Стационарный морской ледостойкий отгрузочный терминал (СМЛОТ) «Ворота Арктики» мощностью 8,5 млн т в год, соединенный с береговой инфраструктурой на мысе Каменный двумя подводными трубопроводами длиной по 3,5 км.

Методы исследований

В ряде опубликованных работ достаточно подробно рассмотрены различные возможности обнаружения зон дегазации по данным ДЗЗ из космоса, включая анализ концентрации метана в атмосфере по данным спектрометра TROPOMI Европейского космического агентства ESA [4—6] и дешифрирование космоснимков в оптическом и радиолокационном диапазонах частот [4—7, 12—19]. На основе комплексного анализа разнородных данных ДЗЗ, проведенного авторами настоящей статьи, и ряда перечисленных выше исследований других авторов был выделен ряд признаков газопроявления из донных отложений термокарстовых озер [4]. В частности, на космоснимках сверхвысокого и высокого разрешений (0,3—2,0 м/пиксель) зоны сипов газа могут быть зафиксированы по изменению альбедо поверхности воды, а в зимнее время — по характерным неоднородностям льда, особенно полыньям/пробоинам [13, 15—19].

В мелководных зонах (обычно до 5 м) термокарстовых озер, рек и морей при прозрачной воде и отсутствии волнения могут быть обнаружены округлые углубления в рельефе дна (затемненные зоны), вокруг которых нередко видны брустверы выброшенной породы (светлые кольцевые формы, обрамляющие углубления) [15—19]. У более старых кратеров брустверы отсутствуют из-за их размыва. Чаще всего наблюдаются не одиночные, а множественные кратеры, количество которых на крупных озерах может достигать многих сотен. Соседние кратеры могут объединяться и формировать углубления сложной конфигурации.

Во время многочисленных полетов на вертолетах в 15 экспедициях 2014—2023 гг. на полуострове Ямал авторы обнаружили и сфотографировали многие сотни водоемов с различными признаками дегазации Земли, включая ТОКВГ [4, 15—19]. Зафиксированные координаты объектов дегазации на основе GPS и/или ГЛОНАСС позволяют идентифицировать их на космоснимках сверхвысокого и высокого разрешений для уточнения координат и последующего занесения в ГИС «АМО», созданную и постоянно развиваемую в Институте проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН [4—9, 15—19]. В качестве

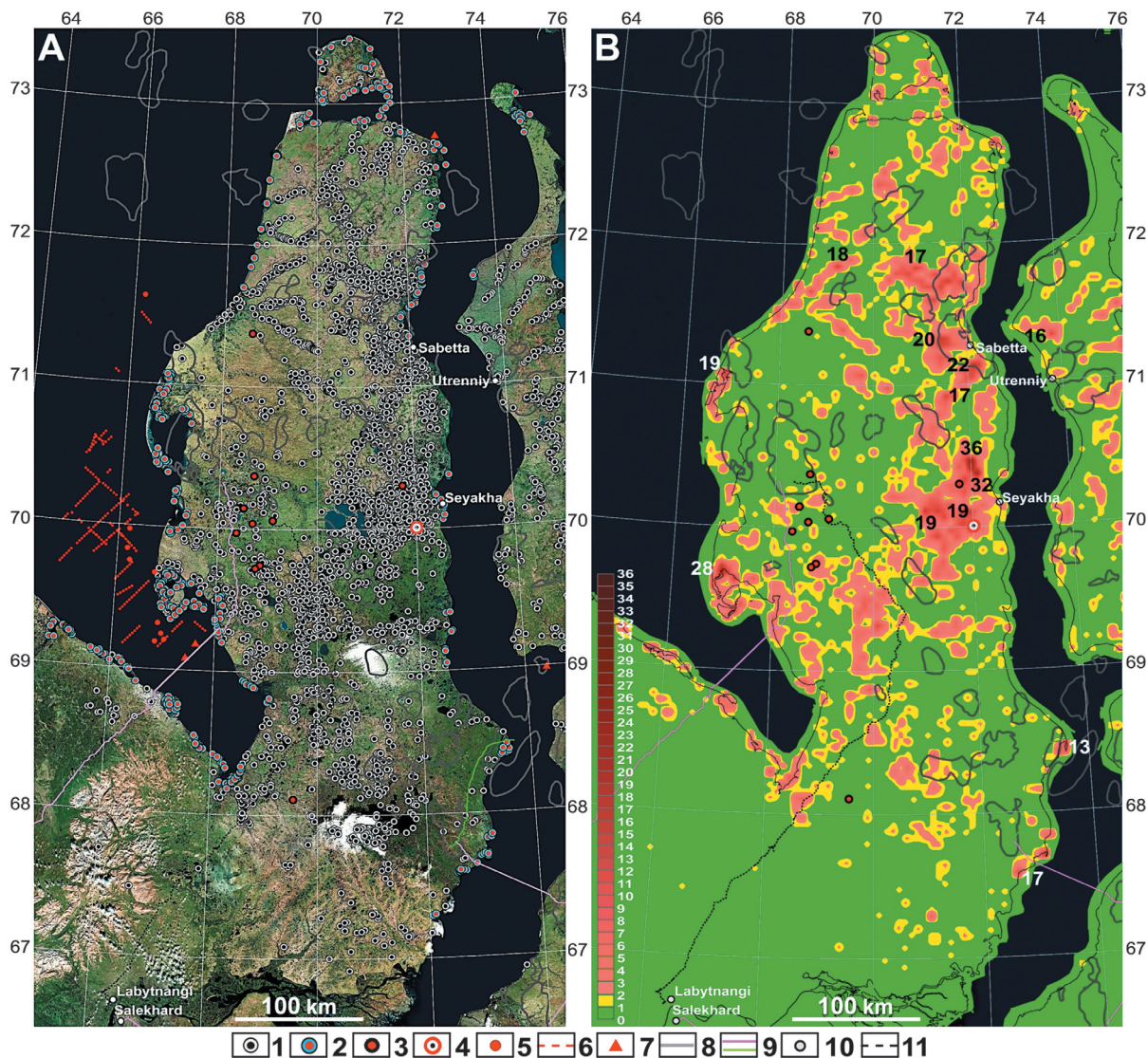


Рис. 1. Схема распространения зон дегазации Земли с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал и прилегающих территориях суши и Карского моря (А) и плотность распространения зон дегазации (В) (картографическая основа – космоснимок ESRI). Обозначения: 1 и 2 – зоны с кратерами на дне термокарстовых озер, рек (1) и Карского моря (2); 3 – кратеры выбросов газа на суше; 4 – озеро Открытие [16; 36]; 5 и 6 – сипы газа на шельфе – одиночные интенсивные (5) и менее интенсивные вдоль профилей эхолота (6) [22–28 и др.]; 7 – выбросы газа при бурении инженерных скважин на шельфе [30]; 8 – месторождения углеводородов; 9 – газопроводы (розовые) и нефтепроводы (зеленые); 10 – города и поселки; 11 – железная дорога

Fig. 1. Distribution scheme of the Earth degassing zones with craters of gas blowouts on the Yamal Peninsula and adjacent territories of land and the Kara Sea (A) and the distribution density of degassing zones (B) (basemap – ESRI satellite image). Designations: 1 and 2 – zones with craters at the bottom of thermokarst lakes, rivers (1) and the Kara Sea (2); 3 – craters of gas blowouts on land; 4 – Lake Otkrytiye [16; 36]; 5 and 6 – gas seeps on the shelf – single intense (5) and less intense along the echo sounding profiles (6) [22–28 etc.]; 7 – gas blowouts during drilling of engineering wells on the shelf [30]; 8 – hydrocarbon deposits; 9 – gas pipelines (pink) and oil pipelines (green); 10 – cities and towns; 11 – railway

космоснимков используются в основном зарубежные со спутников WorldView (WV-1, WV-2 и WV-3), а также отечественные со спутников «Ресурс-П» и «Канопус-В». Особо крупные кратеры (более 25–30 м) удается выделить по данным космоснимков среднего разрешения Sentinel-2. В экспедиционных работах выявлению и картированию покмарок способствует применение БПЛА.

С целью формализации данных о зонах дегазации в ГИС «АМО» было принято считать обособленной зоной дегазации участок протяженностью от 400

до 1000 м, на котором выявлена одна покмарка или их группа, при этом протяженные (несколько километров) поля покмарок разделялись на несколько зон. Расчет средней плотности распространения зон дегазации с кратерами выбросов газа (ПКВГ) был выполнен в программном обеспечении ArcGIS (ESRI, США) на базе осреднения 25 км² (5×5 км), как было принято ранее в работе [5]. Картографические построения были также выполнены в ArcGIS.

На особенно значимых объектах, обнаруженных по данным ДЗЗ из космоса, были проведены специаль-

Таблица 1. Количество зон мощной дегазации с кратерами выбросов газа со дна термокарстовых озер (ТОКВГ), рек и прибрежных частей Карского моря

Table 1. Number of zones of powerful degassing with craters of gas blowouts from the bottom of thermokarst lakes, rivers and coastal parts of the Kara Sea

Регион	Площадь, тыс. км ²	ТОКВГ	ТОКВГ, зоны	Реки, зоны	Карское море, зоны	Всего зон
Полуостров Ямал	~118	3551	4898	94	669	5661
Остров Белый	1,9	9	9	26	69	104
Полуостров Югорский	18	45	69	21	167	257
Итого	~138	3605	4976	141	905	6022

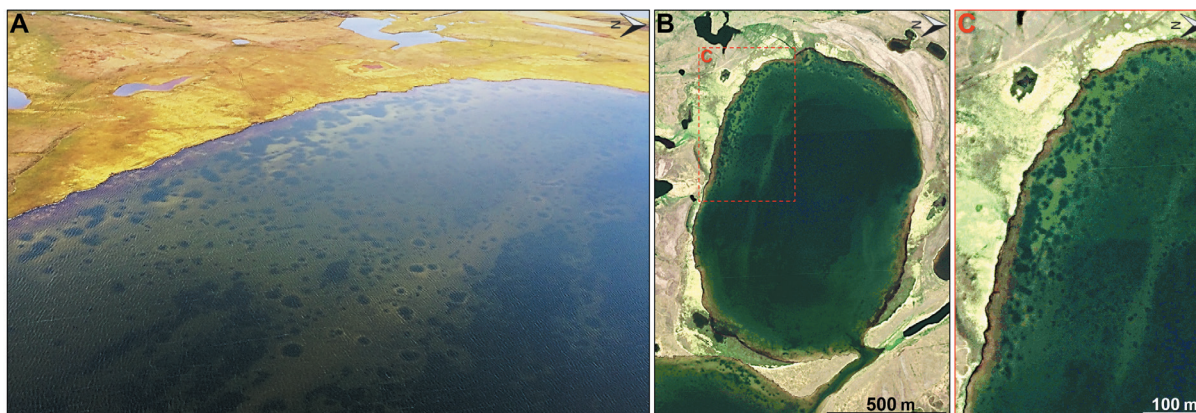


Рис. 2. Термокарстовое озеро Садаврто: аэрофотоснимок из вертолета 17 августа 2015 г. (В. И. Богдавленский) (А), космоснимок WV-2 3 августа 2022 г. (ESRI) (В) и его увеличенный фрагмент (С)

Fig. 2. Thermokarst Lake Sadavarto: aerial image from a helicopter on August 17, 2015 (V. I. Bogoyavlensky) (A), satellite image WV-2 on August 3, 2022 (ESRI) (B) with enlarged area (C)

ные экспедиционные исследования, позволившие не только валидировать результаты дешифрирования космоснимков, но и исследовать эти объекты комплексом геолого-геофизических методов [9, 16—19]. При этом применялись эхолокация, позволяющая фиксировать факелы газа, нередко выходящие из кратеров-покмарок, георадиолокация, а на озере Открытие — широкий комплекс методов, включая сейсморазведку 2D-4D [36].

Также были использованы результаты специальных экспедиций в Карском море АО АМИГЭ и других организаций с применением инженерно-геологического бурения, эхолокационных и геоакустических работ, позволивших обнаружить залежи газа в ВЧР, многочисленные факелы газа, бугры пучения (PLF) и покмарки [22—30].

Результаты исследований

Путем аэрофотосъемки из вертолетов и анализа космоснимков высокого разрешения на полуострове Ямал обнаружено 3551 ТОКВГ (рис. 1А и табл. 1), при этом во многих крупных озерах (диаметр свыше 1 км) было выделено от 2 до 20 зон с кратерами выбросов газа. Отметим, что максимальное количество зон зафиксировано на крупном термокарстовом озере Яднето (размер 8×10,2 км, координаты центра

69,7336° N, 71,3570° E). В итоге на дне ТОКВГ Ямала выявлено 4898 зон дегазации. Кроме того, в береговых частях и руслах рек найдены еще 94 зоны дегазации. Таким образом, в пределах суши Ямала выделены и занесены в ГИС «АМО» 4992 зоны дегазации. Относительно небольшое количество зон дегазации также обнаружено на водоемах полуострова Югорский (90) и острова Белый (35).

В качестве примера на рис. 2 приведен аэрофотоснимок юго-западной части ТОКВГ Садаврто с ярко выраженными многочисленными (более 500) кратерами выбросов газа (многие с брустверами выброшенной породы), сделанный во время полета на вертолете 17 августа 2015 г. в 53 км к северо-западу от порта Сабетта. Как отмечалось выше, привязка сфотографированных объектов с зафиксированными координатами GPS к космоснимкам высокого разрешения позволяет уточнить их координаты для занесения в ГИС «АМО». В частности, аэрофотоснимок (рис. 2А) был идентифицирован с крупной зоной дегазации в юго-западной части ТОКВГ Садаврто с координатами 71,7203° N, 71,5996° E. По данным ДЗЗ (рис. 2В) размеры озера составляют 890×1300 м, при этом кратеры расположены преимущественно в южной и западной частях. Диаметры большинства видимых кратеров меняются от 3 до

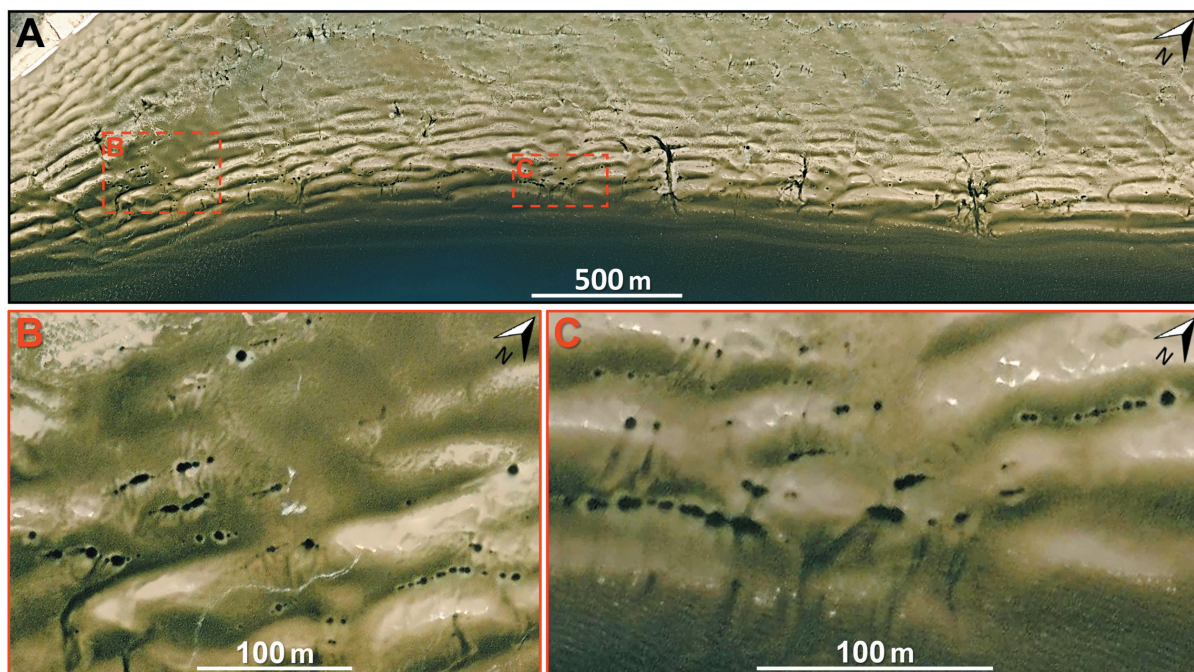


Рис. 3. Космоснимок WV-2 15 июля 2018 г. (ESRI) мелководной части Обской губы в северо-восточной части Ямала с кратерами выбросов газа (А) с двумя увеличенными участками (В и С)
 Fig. 3. Satellite image WV-2 dated July 15, 2018 (ESRI) of the shallow part of the Gulf of Ob in the northeastern part of Yamal with craters of gas blowouts (A) with two enlarged areas (B and C)

12 м, а самый большой кратер имеет диаметр 20 м. Для занесения в ГИС «АМО» на данном озере были выделены три зоны.

В мелководных прибрежных частях Карского моря вокруг полуострова Ямал было найдено и внесено в ГИС «АМО» 669 зон дегазации (см. рис. 1А и табл. 1), а около полуострова Югорский и острова Белый — соответственно 167 и 69 (всего 905 морских зон). Установлено, что эти зоны преимущественно сосредоточены в заливах, лиманах и бухтах, которые в различной степени защищены от крупных морских волн [37]. Абсолютное большинство зон найдено на глубинах дна до 2 м, редко до 3—4 м. Около 50 зон дегазации обнаружено в проливе Малыгина шириной 8—27 км, разделяющем полуостров Ямал и остров Белый. В незащищенном от волнового прибоя мелководье западного побережья Ямала покмарки не выявлены, что вполне очевидно. В открытом море ряд покмарок был найден вдоль северного побережья полуострова Югорский. В частности, группа покмарок обнаружена в море в 6 км юго-восточнее Карской губы в 220—250 м от берега (см. рис. 1) на глубине моря от 2 до 3 м (69,2208° N, 65,2176° E; 69,2305° N, 65,1976° E и др.).

Большое количество зон дегазации найдено около побережья Ямала в гигантской Обской губе, в которой дополнительно выделяется ряд небольших заливов и бухт. В центральной и северной частях Обской губы (см. рис. 1) крупные зоны дегазации обнаружены у северо-восточного побережья Ямала около поселка Тамбей (71,4738° N, 71,8213° E) и к северу от него в устьях рек Тамбей (71,5527° N, 72,0010° E), Продья-

ха (71,6066° N, 72,1711° E), Нензотаяха (71,650° N, 72,1871° E), Сабольяха (71,8586° N, 72,4176° E) и др. При этом на приустьевых участках рек протяженность узких зон достигает 5—9 км.

На рис. 3 приведен фрагмент космоснимка WV-2 15 июля 2018 г. мелководной части Обской губы в 1 км южнее устья реки Сабольяха. В пределах данного космоснимка на глубинах воды до 3 м зафиксировано 510 кратеров с преобладающими размерами от 1 до 6 м, а диаметр самого крупного кратера достигает 11 м (71,8484° N, 72,3714° E). Покмарки преимущественно имеют изометричную форму, однако многие близко расположенные покмарки, объединяясь, формируют эллиптические и более сложные конфигурации (см. рис. 3В и 3С). По характеру покмарок и отсутствию бугров пучения можно предположить преимущественно песчаный состав донного грунта. Для занесения в ГИС «АМО» данный район был разделен на 6 зон с расстоянием между ними от 600 до 950 м (в среднем по 85 покмарок).

У побережья Ямала в Обской губе один из наиболее крупных районов существования газогидродинамических процессов с формированием покмарок обнаружен в бухте Маниха (67,5985° N, 72,6168° E), расположенной в 13,5 км к юго-западу от причала Нового Порта (67,6899° N 72,8960° E). В мелководной прибрежной части этой бухты выделяется обширный район протяженностью до 6,7 км и шириной в его центре от 0,6 до 2 км, на дне которой наблюдается множество (не менее 230) неоднородностей, отождествляемых с покмарками (рис. 4). Удаления покмарок от ближайшего берега варьируют в диапа-

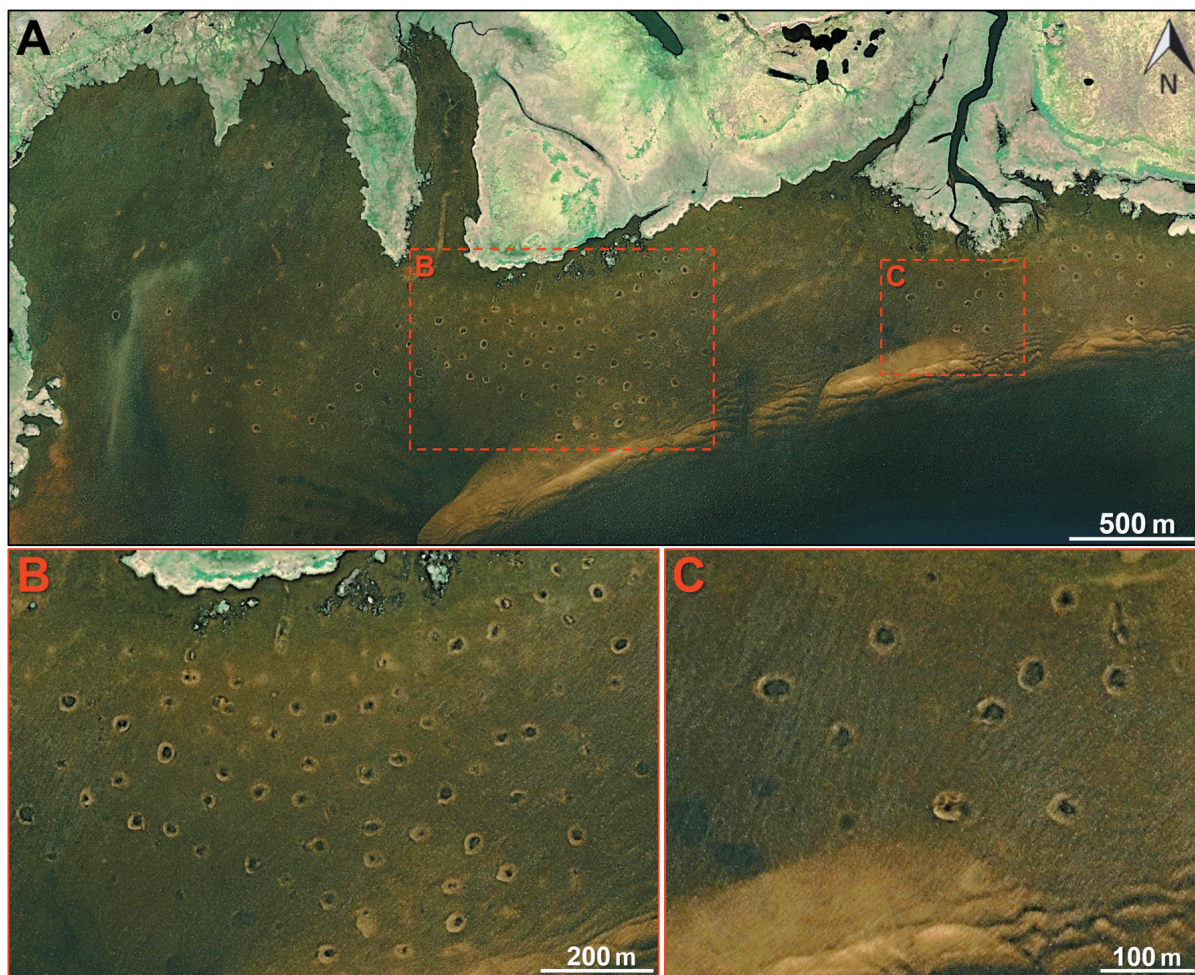


Рис. 4. Космоснимок WV-2 14 июля 2017 г. (ESRI) бухты Маниха в Обской губе (А) с двумя увеличенными участками (В и С)
 Fig. 4. Satellite image WV-2 dated July 14, 2017 (ESRI) of the Manikha Bay in the Gulf of Ob (A) with two enlarged areas (B and C)

зоне от 70 до 1250 м. В основном диаметры кратеров меняются от 12 до 24 м, а диаметр максимального составляет 32 м. Отдельные из них имеют эллиптическую форму и достигают размера 28×45 м, видимо, за счет объединения двух соседних кратеров. При среднем диаметре кратера около 18 м его площадь равна 250 м². Большей частью ПКВГ меняется в диапазоне одна на 2—8 тыс. м², а расстояния между ними — в основном от 50 до 100 м. Покмарки на отдельных участках формируют почти линейно вытянутые группы (см. рис. 4). Всего выделено 23 зоны покмарок с расстояниями между ними от 400 до 600 м.

В бухте Маниха на космоснимке (см. рис. 4) кроме покмарок видны локальные светлые участки округлой формы, отождествляемые нами с предположительно сезонными буграми пучения, редко наблюдаемыми на космоснимках акваторий. По нашему мнению, в данном случае они существуют продолжительное время (недели - месяцы) из-за высоких упруго-прочностных свойств придонных отложений, которые более характерны для преимущественно глинистого и/или песчано-глинистого состава по сравнению с чисто песчаным. При этом большинство покмарок имеет эллиптическую или

более сложную конфигурацию, что отражает локальные особенности физических свойств грунтов. В отдельных случаях наблюдаются не полностью разрушенные своды бугров пучения (см. рис. 4В и 4С), видимо, их разрывы произошли только через наиболее тонкие части. Подобная ситуация наблюдалась в нескольких случаях прорывов газом сводов многолетних бугров пучения на суше, в частности, на Бованенковском объекте С17 в 2020 г. бугор был разрушен лишь в самой верхней (сводовой) части [9]. На основе данных ряда космоснимков WV-2 и Sentinel-2 обоснована сохранность большей части покмарок в 2017-2023 гг. при их медленном замывании осадками.

Крупные покмарки обнаружены в северной части бухты Новый Порт в 3—9 км к северо-западу от причала. Также группа покмарок диаметром 9—22 м обнаружена в 400 м к северу от подводного газопровода «Газ Ямала» (4,3 км южнее причала). В связи с особенно крупными размерами покмарок в бухте Новый Порт для учета в ГИС «АМО» было выделено 26 зон с расстояниями между ними от 400 до 700 м. Сохранность покмарок в северной части бухты обеспечена косой протяженностью около 5 км.

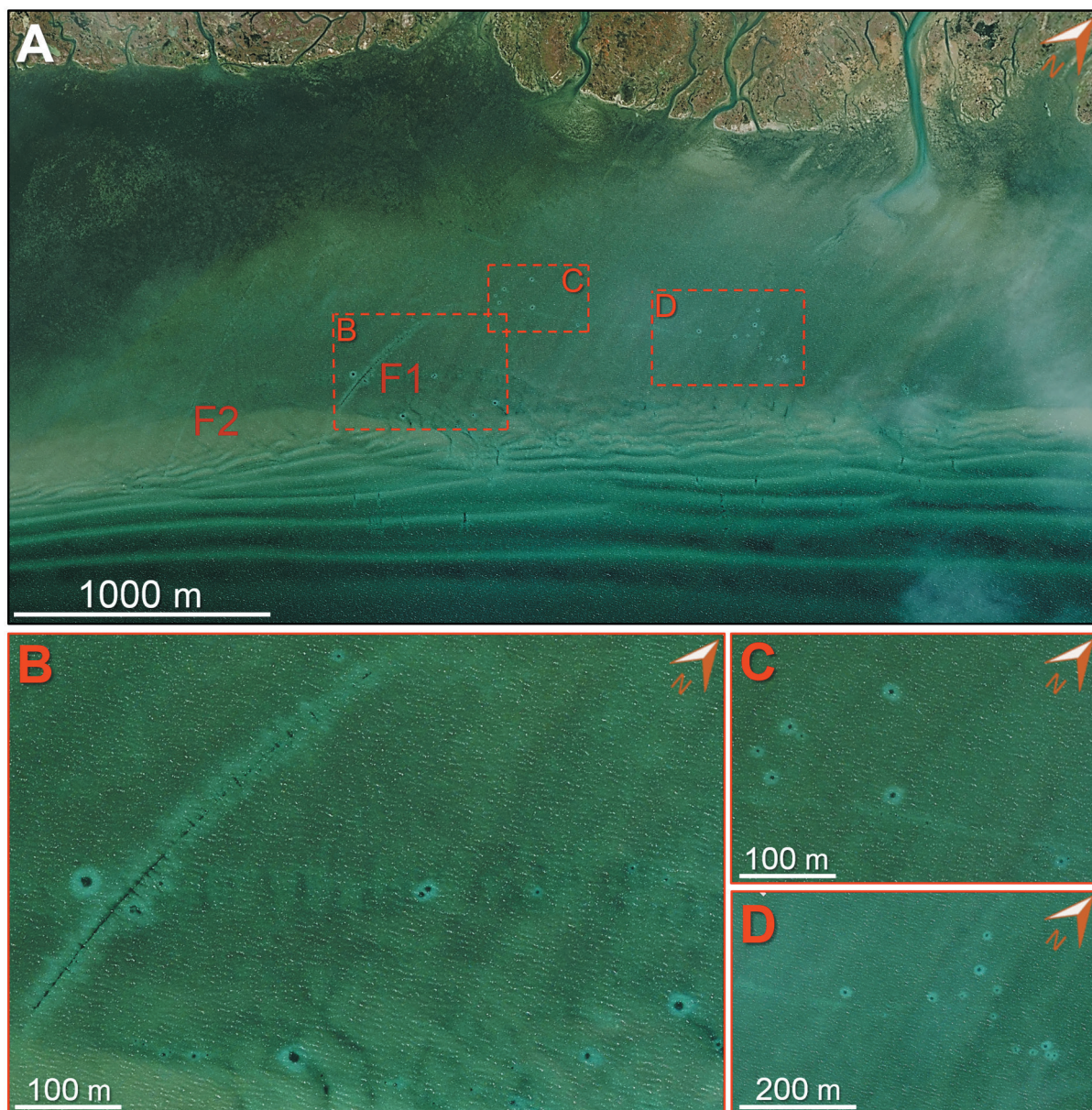


Рис. 5. Космоснимок WV-3 27 августа 2018 г. (ESRI) мелководной части Байдарацкой губы около острова Нгонярто с кратерами выбросов газа (А) с тремя увеличенными участками (В, С и D)
 Fig. 5. Satellite image WV-3 on August 27, 2018 (ESRI) of the shallow part of Baydaratskaya Bay near Ngonyartso Island with gas blowout craters (A) with three enlarged areas (B, C and D)

В прибрежной полосе Ямала в Байдарацкой губе обнаружено большое количество зон распространения покмарок. Штормовая нагрузка в Байдарацкой губе значительно ниже, чем в открытом море, что способствует их сохранению большее время [37]. На рис. 5А приведен фрагмент космоснимка WV-3 27 августа 2018 г. юго-восточного побережья острова Нгонярто, на котором наблюдаются два разрывных нарушения донного грунта (F1 и F2) и не менее 159 покмарок, удаленных от берега на 300—1600 м (в среднем около 900 м). Две самые крупные покмарки имеют диаметр 11 м (расположены в 30 и 215 м от нарушения F1, см. рис. 5В), однако большинство покмарок небольшие — 1—5 м.

Донные грунты вблизи северных и западных берегов Ямала сложены преимущественно мелкими и пылевыми песками [29, с. 41]. Отсутствие бугров пучения на рассматриваемом участке (рис. 5) свидетельствует о быстротечности газодинамических процессов, более характерных для песчаного грунта, чем для глинистого. Наблюдаемая изометричная форма покмарок также характерна для песчаного грунта. Отметим, что южная часть разлома F1 (69,3813° N, 67,2208° E) расположена в 31 км к северо-западу от глубоководной части магистрального подводного газопровода высокого давления «Бованенково — Ухта». Наиболее ярко выраженная южная часть разрыва F1 протяженностью около

500 м имеет субмеридиональную ориентацию, в отдельных местах ширина разрывного нарушения достигает 1—2 м, при этом также выделяются короткие (до 15 м) ортогональные разрывы (рис. 5В). Характерные особенности нарушения F1 не позволяют его объяснить ледовой экзарацией. Судя по светлому фону, края разлома немного подняты, или он обусловлен отложением выброшенного потоком подземного флюида небольшого объема мелкодисперсного материала. Особо интересен выявленный факт приуроченности ряда покмарок к разлому F1, многие из них находятся вблизи (до 10—35 м) или прямо в разломе F1.

Обсуждение результатов

Согласно построенным картографическим схемам распространения обнаруженных зон дегазации на полуострове Ямал, прилегающих территориях суши и акваториях Карского моря (см. рис. 1), плотность их распределения (ПКВГ) характеризуется большой неравномерностью. На Ямале большая часть найденных зон дегазации сосредоточена на широтах 68,2—71,9°, преимущественно в его восточной и центральной частях. Особенно выделяется обширная территория площадью около 15 тыс. км² с повышенной ПКВГ в восточной части Ямала в диапазоне широт 69,9—71,9°, включающая Нейтинско-Сеяхинский и Сабеттинский районы. В значительной степени эта территория перекрывается с районом наиболее широкого распространения многолетних бугров пучения (широты 68,3—70,2°) [17]. Участок их перекрытия площадью около 7 тыс. км² (широты 69,9—70,2°) приурочен к Нейтинско-Сеяхинскому району. Отметим, что экстремально высокая ПКВГ — 36 зон на 25 км², или 1,44 км⁻² — выявлена именно в этом районе вблизи поселка Сеяха (см. рис. 1В). Здесь же нами были обнаружены и исследованы Сеяхинский объект взрыва газа С11 и озера Открытие и Лабварто с явлениями грязевого вулканизма [16—19; 36; 38]. Все это, видимо, обусловлено приуроченностью данного экстремального района к центральной части Ямальского грабен-рифта с активными разломами. Аномалия повышенной ПКВГ к востоку от Сабетты (22 зоны на 25 км², или 0,88 км⁻²), возможно, связана с уникальным по запасам газа Южно-Тамбейским месторождением. Ранее для полуострова Ямал была установлена однозначная региональная связь выявленных зон дегазации с районами повышенной концентрации метана в атмосфере, определенной спектрометром TROPOMI [5].

Необходимо отметить, что на всём многолетних этапах изучения ТОКВГ и других зон дегазации на Ямале основные первоначальные выводы полностью сохранили актуальность, несмотря на то, что в 2019—2020 гг. в ГИС «АМО» их было лишь 415 [5; 17], а в 2024 г. — 4992. Изменились количество зон и детализация картографической схемы ПКВГ (см. рис. 1В), но выявленные ранее закономерности сохранились: Нейтинско-Сеяхинский и Сабеттинский районы являются наиболее газозрывоопасными.

Обнаружена закономерность приуроченности значительной части ТОКВГ к речным долинам. Это может объясняться связью с системами глубинных разломов, к которым часто приурочены не только реки, но также термокарстовые озера и каналы глубинной дегазации, включая грязевые вулканы [18; 19]. Кроме того, озера в речных долинах могут иметь повышенное содержание органики в осадочных отложениях палеорусел, необходимой для генерации бактериального газа *in situ*.

Отметим, что на ряде крупных участков площадью свыше 500—1000 км² в южной, центральной и северной частях Ямала в настоящее время не найдено ни одного ТОКВГ. Главным образом это связано с особенностями распространения системы термокарстовых озер и рек. В гораздо меньшей степени это может быть также связано с недостатком космических снимков.

Прибрежные мелководные участки дна Карского моря подвергаются активным сезонным экзогенным процессам, включая его промерзание в процессе образования льда на поверхности моря. В летнее время на мелководное сезонно-талое дно активно воздействуют штормовые волны и приливно-отливные явления [29]. На основе комплексного исследования «установлено, что шторма с высотами волн более 3 м наблюдаются в среднем около 30 раз в год», при этом наибольшее количество штормов образуется с июля по декабрь (до формирования льда), а высоты максимальных волн в открытой южной части моря могут превышать 6—7 м [37]. Вблизи побережья они снижаются до 2—3 м, а в закрытых заливах и губах — до 1 м. Очевидно, что около побережья открытого моря кратеры выбросов газа быстро заполняются/замываются переотложенными осадками и существуют ограниченное время (несколько дней или даже часов), а в защищенных берегами заливах они могут существовать более длительное время.

В мелководных прибрежных частях Карского моря большое количество зон дегазации связано с активными термоденудационными процессами разрушения берегов и деградацией ММП на бывших участках суши, недавно поглощенных морем. Наибольшая ПКВГ приурочена к губам, заливам, лиманам и бухтам, защищенным от крупных морских волн (см. рис. 1В). Самая высокая ПКВГ оказалась в северной части залива Мутный Байдарацкой губы (28 зон на 25 км², или 1,12 км⁻²), что обусловлено продолжительной сохранностью покмарок благодаря их защите от крупных морских волн косой Моррасальские Кошки и крупными островами Литке и Нго-норцо. Высокий уровень ПКВГ (19 зон на 25 км², или 0,76 км⁻²) оказался в узкой северной части залива Шарпов Шар, защищенной от волн островами Шарповы Кошки. Также высокий уровень ПКВГ получен в бухте Маниха Обской губы (17 зон на 25 км², или 0,68 км⁻²). Относительно высокий уровень ПКВГ получен в бухте Каменная Обской губы (13 зон на 25 км², или 0,52 км⁻²), защищенной от волн косой

Каменная. При этом северная зона дегазации расположена южнее подводного нефтепровода терминала «Ворота Арктики» на 1—1,5 км. Кроме того, покмарки обнаружены вблизи резервуаров с горюче-смазочными материалами.

Отметим, что на больших глубинах, на которые штормовые волны не оказывают влияния, в Карском море предполагается существование большого количества покмарок, как и в других акваториях Мирового океана. Однако эти глубины недоступны изучению по данным ДЗЗ из космоса.

По данным А. Портнова с соавторами [22], в 2012 г. во время экспедиции в Карском море были выявлены обширные участки сипов газа площадью не менее 7500 км², преимущественно расположенные на глубинах свыше 20 м, на основании чего было сделано предположение, что «сплошная подводная вечная мерзлота простирается на глубину около 20 м от берега и создает преграду, через которую газ не может мигрировать». Этому выводу противоречит найденное нами огромное количество покмарок в непосредственной близости от берегов (удаления 0—2,2 км), в том числе в районах однозначного существования субаквальных ММП, включая залив Шарапов Шар с подтвержденным существованием ММП. Кроме того, этому выводу противоречит информация об интенсивном сипе газа, обнаруженном в той же экспедиции 2012 г. в 1,5 км от берега на глубине моря 6 м недалеко от гидрометеорологической станции «Марсалея» (также упоминается как «Моррасале») [22]. Все эти данные неоспоримо свидетельствуют, что интенсивная (в том числе взрывная) эмиссия газа также происходит в районах существования ММП. При этом весьма вероятно, что газ выделяется при дегазации криопэггов, диссоциации газогидратов и/или мигрирует из глубоких горизонтов по разломам. В результате бурения ряда инженерно-геологических скважин АО АМИГЭ в комплексе с геоакустическими исследованиями в Карском море ММП выявлены в ряде мест на глубинах моря до 120 м на глубинах 5—60 м от дна (в 77% случаев до 30 м) и мощностью до 100 м [39]. Островные ММП также были вскрыты на Русановском месторождении [40].

Касательно возможного генезиса газа можно отметить следующее. По данным И. Л. Кузина [10], изотопный анализ гелия и углерода в ТОКВГ показал как бактериальный генезис газа, так и глубинный (термогенный). В южной части Ямала в составе газа Еркутинского кратера С12 выявлены этан и пропан, что свидетельствует о притоке газа с больших глубин из зоны генерации нефти и жирного газа [41]. Изотопный состав углерода метана $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ из проб придонного газа в районе пингоподобных поднятий в Карском море (от $-55,1\text{‰}$ до $-88,0\text{‰}$) свидетельствует смешанном генезисе, обусловленном микробным производством метана *in situ* и его миграцией из более глубокого источника (от $-55,1\text{‰}$ до $-62,1\text{‰}$) [23]. Отметим, что значительная часть гигантских апт-сеноманских залежей севера Западной Сибири, включая Бованенковское и Ямбургское

НГКМ, имеет $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ от $-50,9\text{‰}$ до $-64,7\text{‰}$ [42]. На основании изучения распределения метана и его гомологов в донных отложениях Байдарацкой губы специалистами АО «Росгео» (АО «Южморгеология», М. В. Кругликова и др., 2018) был сделан вывод о глубинном генезисе найденных сипов газа и газопроявлений вокруг острова Нгонярко (см. рис. 1 и 5). При этом рассматриваемый район покмарок (см. рис. 5) относится к зоне высокой вероятности открытия месторождений углеводородов.

Несмотря на ограниченный объем исследований процессов дегазации Земли на дне ямальских термокарстовых озер, рек и Карского моря, на основе доступных материалов можно утверждать о широком распространении загазованных придонных отложений с прямыми выходами (сипами) газа, которые были зафиксированы при эхолокации и геохимических исследованиях состава растворенных газов, а также при обнаружении кратеров-покмарок по данным ДЗЗ [4—6, 15—19, 22—30].

Наблюдаемые в ряде случаев бугры пучения на дне (например, см. рис. 3) и обнаруженные крупные размеры кратеров свидетельствуют о наиболее вероятном локализованном скоплении газа на небольших глубинах от дна. При этом за счет давления газа при наличии покрывки может происходить газовый разрыв пласта с формированием газонасыщенной полости и бугра пучения. Механизм формирования газонасыщенных полостей подтверждается проведенными нами физическим моделированием выбросов газа в водонасыщенных песчаных средах. Накапливанию газа на отмелях пресноводных термокарстовых озер и заливов/губ способствует формирование в зимнее время временной покрывки из припайного льда и замерзшего грунта, после таяния которых в начале лета могут происходить массовые выбросы газа с формированием кратеров, подобных обнаруженным в Обской губе в бухте Маниха (см. рис. 4).

При проведении инженерно-геологических исследований АО АМИГЭ в процессе бурения скважин неоднократно фиксировались выбросы газа, в том числе в районе подземного перехода газопровода «Бованенково — Ухта» в Байдарацкой губе, а также в северной и центральной частях Обской губы [30]. Строительство и эксплуатация подводного газопровода «Бованенково — Ухта» ООО «Газпром трансгаз Ухта» (давление 120 атм) осложнялись наличием ММП и высокой газонасыщенностью верхнеплейстоценовых песчаных и песчано-глинистых отложений в интервале глубин 1,5—22 м [35]. Несмотря на бетонное покрытие труб газопровода диаметром 1219 мм и их заглубление на 5 м в донный грунт для защиты от ледовой экзарации, в северных (вблизи Ямала) частях двух линий на отдельных участках дважды происходили их аварийные всплытия (первая линия — в 2018 г., четвертая линия — в 2019 г.) на общей протяженности около 9,2 км [43]. В итоге капитальных ремонтных работ с применением сплошной гравийной обсыпки вновь заглубленного трубопровода в 2020 и 2021 гг. были восстановле-

ны проектные положения ниток морского участка подводного перехода через Байдарацкую губу. Согласно официальным данным ПАО «Газпром», ремонтные работы на первой линии были проведены на участке протяженностью 2,01 км на глубине дна 7—8 м, при этом «из Мурманска баржами был доставлен щебень в объеме 51 тыс. куб. метров» [44]. Описания причин всплытия трубопроводов в открытых источниках не найдены.

Однако не вызывает сомнений, что возможная интенсивная природная дегазация Земли, особенно происходящая в процессе деградации субаквальных ММП и диссоциации газогидратов, способна кардинально изменить упруго-прочностные свойства придонного грунта, при этом его разжижение и насыщение газом может способствовать всплытию трубопроводов. Кроме того, мощные взрывы/выхлопы газа с образованием кратеров могут привести к локальному повреждению герметичности трубопроводов с возникновением аварийных и даже катастрофических ситуаций.

Заключение

Современные данные ДЗЗ из космоса и с применением БПЛА позволяют решать широкий круг задач, связанных с выявлением и картированием явлений эмиссии газа в гидросферу и атмосферу, наблюдаемых на водной поверхности, во льду и на дне термокарстовых озер, рек и мелководных частей Карского моря и других акваторий Северного Ледовитого океана.

В итоге комплексных аэрокосмических исследований на полуострове Ямал на дне 3551 термокарстового озера и 16 рек обнаружены 4992 зоны мощных выбросов (взрывов) газа в виде кратеров (покмарок). Кроме того, в прибрежных зонах Карского моря около Ямала выявлено еще 669 зон взрывной дегазации, преимущественно в губах, заливах, лиманах и бухтах. С учетом полуострова Югорский и острова Белый всего в регионе исследований найдены 6022 зоны взрывной дегазации, включая 905 морских. Выявлена и обоснована закономерность приуроченности значительной части термокарстовых озер с кратерами выбросов газа к речным долинам. Подтверждены ранее сделанные выводы, что Нейтинско-Сеяхинский и Сабеттинский районы являются наиболее газовзрывоопасными.

Комплексный анализ полученных результатов и данных анализа концентрации метана в атмосфере с помощью спектрометра TROPOMI [5; 6] показал, что термокарстовые озера, реки (особенно в устьевых частях) и прибрежные зоны Карского моря являются активным источником эмиссии метана в атмосферу, при этом эмиссия может быть как непрерывной струйной (газовые факелы), так и мощной импульсной взрывной. В последнем случае на дне водоемов формируются кратеры/покмарки, размер которых зависит от мощности выброса/взрыва газа (пластового давления и объема газа) и от упруго-прочностных свойств придонных отложений. Вы-

брасываемый на севере Западной Сибири газ имеет как приповерхностный биохимический, так и глубинный катагенетический генезисы.

Проведенные исследования показали, что возможная интенсивная дегазация Земли, особенно происходящая в процессе деградации субаквальных ММП и диссоциации газогидратов, способна кардинально изменить упруго-прочностные свойства придонного грунта, при этом его разжижение и насыщение газом может нарушить условия строительства различных объектов, включая подводные трубопроводы.

Широко распространенные на севере Западной Сибири мощные пневматические взрывы газа с образованием кратеров, нередко сопровождающиеся самовоспламенением газа, усиливающим энергию взрыва, способны привести к пожарам в тундре и серьезным повреждениям объектов нефтегазового комплекса с возникновением аварийных и даже катастрофических ситуаций, несущих угрозы его эффективности, а также экологической безопасности региона. Возникающие при этом экономические и репутационные риски угрожают национальной безопасности страны.

Финансирование

Работа выполнена по госзаданию ИПНГ РАН 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. Biskaborn B. K., Smith S. L., Noetzi J. et al. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 2019, vol. 10, p. 264.
2. Jackson R. B., Saunio M., Bousquet P. et al. Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. *Environmental Research Letters*, 2020, vol. 15, no. 7, p. 071002.
3. Saunio M., Stavert A. R., Poulter B. et al. The Global Methane Budget 2000—2017. *Earth Syst. Sci. Data*, 2020, vol. 12, pp. 1561—1623.
4. 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 и экономика. — 2016. — № 3 (23). — С. 4—15.
5. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Никонов Р. А. и др. Дегазация Земли в Арктике: генезис природной и ан-

тропогенной 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).

6. *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).

7. *Богоявленский В. И.* Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Горная промышленность. — 2020. — № 1. — С. 97—118.

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

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

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

9. *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)

10. *Кузин И. Л.* О природе аномальных озер — показателей скопления углеводородов в глубоких горизонтах осадочного чехла // Проблемы оценки новых зон нефтегазоаккумуляции в основных продуктивных толщах Западной Сибири. — СПб.: ВНИГРИ, 1992. — С. 129—137.

Kuzin I. L. About the nature of anomalous lakes — indicators of the accumulation of hydrocarbons in the deep horizons of the sedimentary cover. *Problems of assessing new oil and gas accumulation zones in the main productive strata of Western Siberia*. St. Petersburg, VNIGRI, 1992, pp. 129—137. (In Russian).

11. *Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M. et al.* Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. *Science*, 2017, vol. 356, no. 6341, pp. 948—953. DOI: 10.1126/science.aal4500.

12. *Walter Anthony K. M., 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. Available at: <https://doi.org/10.1038/ngeo1480>.

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/SO20596141504003X.

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.

14. *Сизов О. С.* Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // Геоматика. — 2015. — № 1. — С. 53—68.

Sizov O. S. Remote analysis of surface gas shows effects on the North of Western Siberia. *Geomatika*, 2015, no. 1, pp. 53—68. (In Russian).

15. *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).

16. *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. et al. 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).

17. *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. et al. 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).

18. *Богоявленский В. И.* Новые данные о грязевом вулканизме в Арктике на полуострове Ямал // Докл. РАН. Науки о Земле. — 2023. — Т. 512, № 1. — С. 92—99. DOI: 10.31857/S2686739723601084.
- Vogoyavlensky V. I.* New Data on Mud Volcanism in the Arctic on the Yamal Peninsula. *Doklady Earth Sciences*, 2023, vol. 512, pt. 1, pp. 847—853. DOI: 10.1134/S1028334X23601116.
19. *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.
- Vogoyavlensky 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, 13 p. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-353-368.
20. *Облогов Г. Е., Васильев А. А., Орехов П. Т. и др.* Газовые воронки и метан в озерных отложениях Ямала // Криосфера Земли. — 2024. — Т. 28, № 1. — С. 50—61.
- Oblogov G. E., Vasiliev A. A., Orekhov P. T. et al.* Gas funnels and methane in lake sediments of Yamal. *Cryosphere of the Earth*, 2024, vol. 28, no. 1, pp. 50—61. DOI: 10.15372/KZ20240105. (In Russian).
21. *Judd A., Hovland M.* Seabed fluid flow — impact on geology, biology and the marine environment. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2007, 400 p.
22. *Portnov A., Smith A. J., Mienert J. et al.* Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf. *Geophysical Research Letters*, 2013, vol. 40, pp. 3962—3967. DOI: 10.1002/grl.50735.
23. *Serov P., Portnov A., Mienert J. et al.* Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2015, 120, pp. 1515—1529. DOI: 10.1002/2015JF003467.
24. *Фирсов Ю. Г., Иванов М. В., Колосков Е. Н.* Новый этап батиметрических исследований северных акваторий России на примере Карского моря // Вестн. Гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2014. — Вып. 6. — С. 115—124.
- Firsov Yu. G., Ivanov M. V., Koloskov E. N.* A new stage of bathymetric studies of the northern waters of Russia using the example of the Kara Sea. *Bull. of the State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S. O. Makarova*, 2014, iss. 6, pp. 115—124. (In Russian).
25. *Миронюк С. Г., Колюбакин А. А., Голенок О. А. и др.* Грязевулканические структуры (вулканоиды) Карского моря: морфологические особенности и строение // Геология морей и океанов: Материалы XXII Международной научной конференции (школы) по морской геологии. — 2019. — Т. 5. — М.: ИО РАН. — С. 192—196.
- Mironyuk S. G., Kolyubakin A. A., Golenok O. A. et al.* Mud volcanic structures (volcanoids) of the Kara Sea: morphological features and structure. *Geology of seas and oceans: Materials of the XXII International Scientific Conference (School) on Marine Geology*, 2019, vol. 5. Moscow, IO RAS, pp. 192—196. (In Russian).
26. *Еременко Е. А., Денисова А. П., Мороз Е. А. и др.* Рельефообразующая роль дегазации на Баренцево-Карском шельфе // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. — 2021. — Вып. 8. — С. 73—81.
- Eremenko E. A., Denisova A. P., Moroz E. A. et al.* The relief-forming role of degassing on the Barents-Kara shelf. *Relief and Quaternary formations of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*, 2021, iss. 8, pp. 73—81. DOI: 10.24412/2687-1092-2021-8-73-81. (In Russian).
27. *Соколов С. Ю., Мороз Е. А., Сухих Е. А. и др.* Проявления глубинной дегазации в водной толще и верхней части разреза Печорского моря // Георесурсы. — 2019. — Т. 21, № 4. — С. 68—76.
- Sokolov S. Yu., Moroz E. A., Sukhikh E. A. et al.* Manifestations of deep degassing in the water column and the upper part of the Pechora Sea section. *Georesursy*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 68—76. Available at: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.4.68-76>. (In Russian).
28. *Соколов С. Ю., Мороз Е. А., Зарайская Ю. А. и др.* Картирование опасных геологических объектов и процессов северной и центральной частей шельфа Баренцева моря по данным гидроакустического комплекса НИС «Академик Николай Страхов» // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 2. — С. 164—179.
- Sokolov S. Yu., Moroz E. A., Zarayskaya Yu. A. et al.* Mapping of dangerous geological objects and processes at the Northern and Central parts of the Barents Sea shelf according to the hydroacoustic data from RV “Akademik Nikolai Strakhov”. *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 164—179. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-164-179. (In Russian).
29. *Мельников В. П., Спесивцев В. И.* Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. — Новосибирск: Наука, 1995. — 198 с.
- Melnikov V. P., Spesivtsev V. I.* Engineering-geological and geocryological conditions of the shelf of the Barents and Kara seas. *Novosibirsk, Nauka*, 1995. 198 p. (In Russian).
30. *Рокос С. И.* Инженерно-геологические особенности приповерхностных зон аномально высокого пластового давления на шельфе Печорского и Южной части Карского моря // Инженер. геология. — 2008 — № 4. — С. 22—28.
- Rokos S. I.* Engineering-geological features of near-surface zones of abnormally high reservoir pressure on the shelf of the Pechora and Southern Kara seas. *Engineering Geology*, 2008, no. 4, pp. 22—28. (In Russian).
31. *Крицук Л. Н.* Подземные льды Западной Сибири. — М.: Науч. мир, 2010. — 352 с.
- Kritsuk L. N.* Ground ice of Western Siberia. *Moscow, Scientific world*, 2010, 352 p. (In Russian).
32. *Якушев В. С.* Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИГАЗ, 2009. — 192 с.

- Yakushev V. S. Natural gas and gas hydrates in the permafrost zone. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (In Russian).
33. Бадю Ю. Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование 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).
34. 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 oil and gas potential of Yamal. Moscow, Nedra-Biznestsentr, 2003, 352 p. (In Russian).
35. Миронюк С. Г. Оценка экологических последствий строительства и эксплуатации подводного перехода магистрального газопровода через Байдарацкую губу (Карское море) // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 3 (15). — С. 72—78.
Mironyuk S. G. Assessment of the environmental consequences of the construction and operation of the underwater crossing of the main gas pipeline across Baydaratskaya Bay (Kara Sea). Arctic: Ecology and Economy, 2014, no. 3 (15), pp. 72—78. (In Russian).
36. 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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-93-104.
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).
37. Мысленков С. А., Платонов В. С., Сильвестрова К. П., Добролюбов С. А. Рост штормовой активности в Карском море с 1979 по 2019 г. по данным моделирования. — Докл. РАН. Науки о Земле. — 2021. — Т. 498, № 2. — С. 175—182. — DOI: 10.31857/S2686739721060128.
Myslenkov S. A., Platonov V. S., Silvestrova K. P., Dobrolyubov S. A. Increase in storm activity in the Kara Sea from 1979 to 2019 according to modeling data. Doklady Earth Sciences, 2021, vol. 498, no. 2, pp. 502—508. DOI: 10.1134/S1028334X2106012X.
38. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al. Seyakha catastrophic gas blowout and explosion from the cryosphere of the Arctic Yamal Peninsula. Cold Regions Science and Technology, 2022, vol. 196, 103507, 20 p. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103507>
39. Васильев А. А., Рекант П. В. Береговая и субаквальная мерзлота Карского моря // Тр. Десятой Международной конференции по мерзлотоведению, Салехард, 25—29 июня 2012 г. Т. 3. — Тюмень: ТГУ, 2012. — С. 53—56.
Vasiliev A. A., Rekant P. V. Coastal and subaqueous permafrost of the Kara Sea. Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost Science, Salekhard, June 25—29, 2012. Vol. 3. Tyumen, TSU, 2012, pp. 53—56. (In Russian).
40. Дзюбло А. Д., Алексеева К. В. Геокриологические условия мелководного шельфа Карского моря // Neftegaz.RU. — 2020. — № 5. — С. 75—81.
Dzyublo A. D., Alekseeva K. V. Geocryological conditions of the shallow shelf of the Kara Sea. Neftegaz.RU, 2020, no. 5, pp. 75—81. (In Russian).
41. Chuvilin E., Stanilovskaya J., Titovsky A. et al. A Gas-Emission Crater in the Erkuta River Valley, Yamal Peninsula: Characteristics and Potential Formation Model. Geosciences, 2020, 10, 170, pp. 1—16. Available at: <https://doi:10.3390/geosciences10050170>.
42. Немченко Н. Н., Ровенская А. С., Шоелл М. Происхождение природных газов гигантских газовых залежей севера Западной Сибири // Геология нефти и газа. — 1999. — № 1—2. — С. 45—56.
Nemchenko N. N., Rovenskaya A. S., Shoell M. Origin of Natural Gases in Giant Gas Deposits of Northern Part of Western Siberia. Russian oil and gas geology, 1999, no. 1—2, pp. 45—56. (In Russian).
43. В Карском море всплыла уже вторая нитка «Газпрома» через Байдарацкую губу // Интерфакс. — 2019. — 20 нояб. — URL: <https://www.interfax.ru/russia/684931>.
- The second line of Gazprom through Baydaratskaya Bay has already surfaced in the Kara Sea. Interfax, November 20, 2019. Available at: <https://www.interfax.ru/russia/684931>. (In Russian).
44. Завершены работы на подводном переходе магистрального газопровода «Бованенково — Ухта» через Байдарацкую губу // ПАО «Газпром». — 2020. — 19 окт. — URL: <https://www.gazprom.ru/about/subsidiaries/news/2020/october/article515979/>.
Work has been completed on the underwater crossing of the Bovanenkovovo — Ukhta gas pipeline through Baydaratskaya Bay. PJSC Gazprom. October 19, 2020. Available at: <https://www.gazprom.ru/about/subsidiaries/news/2020/october/article515979/>. (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.

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

EXPLOSIVE DEGASSING OF THE EARTH ON THE YAMAL PENINSULA AND THE ADJACENT KARA SEA

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

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

For citing

Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Explosive degassing of the Earth on the Yamal Peninsula and the adjacent Kara Sea. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 2, pp. 177—191. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-177-191. (In Russian).

The article was received on February 18, 2024

Abstract

Remote sensing data from space and using UAVs make it possible to solve a wide range of tasks related to the study of Earth degassing processes in the Arctic. For the first time, via comprehensive aerospace research on the Yamal Peninsula, we have discovered 4992 zones of gas blowouts (explosions) in the form of craters (pockmarks) at the bottom of 3551 thermokarst lakes and 16 rivers. In addition, we have identified another 669 zones of explosive degassing in the coastal zones of the Kara Sea, mainly in gulfs, estuaries and bays. Taking into account the Yugorsky Peninsula and Bely Island, we have detected 6022 explosive degassing zones in the studying region, including 905 ones offshore. We have proved previously made conclusions that the Neytinsko-Seyakhinsky and Sabetta districts are the most gas-explosive. It is substantiated that possible intense natural degassing of the Earth, especially occurring in the process of degradation of subaquatic permafrost and dissociation of gas hydrates, can radically change the elastic-strength properties of bottom soil, while its saturation with gas can disrupt conditions for the construction of various objects, including underwater gas pipelines. Widespread gas blowouts in the north of Western Siberia with the formation of craters on land and offshore can lead to emergencies and even disasters at oil and gas industrial facilities and to fires in the tundra.

Keywords: *Yamal, Kara Sea, explosive degassing of the Earth, pingo-like features (PLF), craters, pockmarks, gas seeps, gas hydrates, remote sensing (RS).*

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 Yamal-Nenets Autonomous Area, Gazprom PJSC, NOVATEK PJSC and the Russian Center for 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.

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

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