ВЗРЫВНАЯ ДЕГАЗАЦИЯ ЗЕМЛИ НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ: СУША И ПРИБРЕЖНЫЕ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

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

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2025 г.

Для цитирования

Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Взрывная дегазация Земли на севере Западной Сибири: суша и прибрежные части Карского моря // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 2. — С. 162—176. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-162-176.

Обосновано, что данные аэрокосмических наблюдений позволяют успешно изучать опасные объекты взрывной дегазации Земли. В итоге комплексных аэрокосмических исследований в северной части Западной Сибири обнаружены 7783 зоны взрывной дегазации, в том числе 6300 на дне 4736 термокарстовых озер, 139 на дне 29 рек и 1344 на мелководных участках Карского моря. Наиболее крупный Нейтинско-Сеяхинский район дегазации совпадает с центральной частью Ямальского грабен-рифта, а Сабеттинский район приурочен к Южно-Тамбейскому месторождению. Зоны интенсивной дегазации также обнаружены в северной части залива Мутный, в Обской и Тазовской губах Карского моря. Крупные очаги дегазации, видимо, имеют связь с субвертикальной миграцией глубинного газа по проницаемым разломам и/или диссоциацией газогидратов в процессе развития таликов на непромерзающих до дна озерах и реках.

Ключевые слова: Западная Сибирь, Ямал, Карское море, взрывная дегазация Земли, бугры пучения, кратеры, покмарки, сипы газа, газогидраты, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ).

Введение

Гигантская Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция, включающая южную акваторию Карского моря с Обской, Тазовской и Байдарацкой губами, является одной из важнейших мировых кладовых углеводородного сырья [1—3]. Ее северный преимущественно газоносный регион представляется как самый крупный в мире по запасам и ресурсам природного газа [3]. Здесь обнаружены уникальные по запасам газа месторождения Уренгойское, Ямбургское, Бованенковское и Заполярное, входящие десятку крупнейших газовых месторождений мира. Обнаруженные залежи газа большинства месторождений характеризуются многопластовым характером, захватывающим широкий стратиграфический палеозой-кайнозойский комплекс.

На суше северной части Западной Сибири верхняя часть разреза (ВЧР), сложенная песчано-глинистыми палеоген-четвертичными отложениями, пре-

острове Ямал и достигает 500 м в восточной части полуострова Гыданский [4]. Бурение мерзлотно-параметрических скважин в центральной части Ямала на Бованенковском нефтегазоконденсатном месторождении (НГКМ) доказало, что «на отдельных участках мерзлая толща имеет двух- и трехслойное строение» [5, с. 183, 397, 398] с криопэгами, создающими возможность субгоризонтальной миграции газа, часть которого может разгружаться в атмосферу через талики, приуроченные к термокарстовым озерам и рекам. Из ряда скважин с глубин 20-120 м получены притоки газа объемом до 14 тыс. м³/сут (скважина 65-П-3), при этом максимальная продолжительность выхода газа наблюдалась из интервала 70—90 м [6—8]. В скважине № 64 южной части Бованенковского НГКМ горение факела от первоначального дебита 3000 м³/сут (30 сут) до стабильного 500 м³/сут продолжалось в тече-

имущественно находится в мерзлом состоянии, при

этом мошность многолетнемерзлых пород (ММП)

в основном изменяется от 200 до 400 м на полу-

[©] Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А., 2025

ние 550 сут. Всего в данном факеле сгорело более 300 тыс. м³ газа. Газопроявления наблюдались преимущественно из суглинистых отложений с прослоями песка и супеси, а также песчаных и супесных отложений [5].

На Бованенковском НГКМ встречаются газонасыщенные пласты с аномально высокими пластовыми давлениями. В частности, при бурении скважины 26 с буровым раствором плотностью 1,22 г/см³ при забое 131 м произошел его выброс на высоту 10 м [8]. Выделение газа продолжалось даже при утяжелении раствора до 1,57 г/см³.

В абсолютном большинстве случаев в составе газа присутствуют метан (71,3—97,2%) и азот (1,4—21,2%) [5]. Лишь в очень немногих случаях содержание метана снижается до 49,9% и даже 7,9%, при этом содержание азота достигает 39,5% и 60,7%. Отметим, что присутствие при этом кислорода (до 8%) подвергает сомнению чистоту взятия образцов газа.

На севере Западной Сибири залежи газогидратов могут существовать в стабильном и/или метастабильном состояниях [5—10], при этом в районе Бованенковского НГКМ обосновано существование залежей газогидратов на глубинах от 15 до 500— 600 м [5; 7; 8]. Наличие газогидратов и ММП, цементирующих частицы горных пород, значительно снижает газопроницаемость осадочных отложений, что подтверждено экспериментальными исследованиями [10].

Происходящее глобальное потепление климата, особенно сильно сказывающееся на арктических регионах [11—16], активизирует деградацию ММП, снижающую упруго-прочностные свойства приповерхностных грунтов и несущую угрозы возникновения катастрофических деструктивных процессов на строительных объектах разного назначения, включая инфраструктуру нефтегазовых промыслов.

Под действием экзогенных и эндогенных факторов расширяются и углубляются талики в непромерзающих зимой термокарстовых озерах и реках. что порождает хорошие каналы субвертикальной миграции газа. При этом происходящие в таликах изменения условий стабильности и метастабильности законсервированных газогидратов приводят к их диссоциации, что может увеличивать объем эмиссии газа (преимущественно метана) в атмосферу [11—16]. Это дополнительно способствует активизации газодинамических процессов и усилению объемов выбросов газа, в том числе в мощной взрывной форме с формированием кратеров как на суше Арктики, так и на дне озер, рек и арктических морей в зонах существования реликтовых субаквальных ММП [16-23]. При этом увеличение эмиссии метана и других газов в атмосферу способствует усилению парникового эффекта, однако степень этого усиления остается дискуссионной [11—16].

В 2014—2024 гг. на суше севера Западной Сибири было обнаружено более 20 гигантских кратеров, исследования значительной части которых показало, что они образовались под действием мощной взрывной дегазации недр, при этом разлет кусков мерзлой породы и ледогрунта на ряде объектов достигал 300—400 м [16—20]. Очевидцы пяти случаев выбросов газа свидетельствуют о самовоспламенениях и взрывах газа, что делает данное явление крайне опасным.

В связи с вышесказанным в мире вопросам дегазации Земли (природной эмиссии парниковых газов в атмосферу) традиционно уделяется очень большое внимание, что в значительной степени связано с изучением влияния парниковых газов на происходящие климатические изменения [11—16]. В последнее десятилетие в России также резко расширились исследования различных проявлений дегазации Земли в Арктике, чему способствовало использование технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, вертолетов и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [13, 15—20].

За 11-летний период исследований нами получена информация о широкомасштабной дегазации Земли со дна термокарстовых озер, рек севера Западной Сибири, а также со дна прилегающей к суше мелководной части шельфа Карского моря [16—23]. При этом ежегодное вовлечение в работу новых космоснимков высокого разрешения позволило многократно увеличить количество выявленных зон дегазации. В частности, количество обнаруженных термокарстовых озер с кратерами выброса газа (ТОКВГ) на полуострове Ямал увеличилось с 368 в 2019 г. [21, с. 42] до 3551 в начале 2024 г. [16, с. 181], при этом количество зон дегазации на этих озерах достигло 4898, а в реках Ямала — 94. Кроме того, кардинальное развитие получили исследования прибрежных зон Карского моря, в которых около полуострова Ямал было обнаружено 669 зон дегазации [16]. Таким образом, на Ямале и прилегающей акватории Карского моря была обнаружена 5661 зона мощной дегазации Земли.

Необходимо отметить, что впервые подобные объекты исследовались в экспедициях на Тазовском полуострове на Уренгойской площади в начале 1970-х годов И. Л. Кузиным [24].

Цель данной работы — развитие ранее начатых нами исследований распространения зон интенсивной (взрывной) дегазации Земли [16—23] для северной части Западной Сибири с особым вниманием к сопредельному мелководью Карского моря (включая Обскую, Тазовскую и Байдарацкую губы), а также комплексный анализ особенностей пространственного распределения этих зон для снижения природных угроз жизнедеятельности человека в Арктике, особенно при освоении ресурсов углеводородов.

Методы исследований

По данным Д33 на космоснимках сверхвысокого и высокого разрешения (0,3—2,0 м) зоны дегазации Земли могут быть зафиксированы по ряду прямых и косвенных признаков, рассмотренных в [22; 23;

Научные исследования в Арктике



Рис. 1. Картографическая схема распространения зон дегазации Земли на севере Западной Сибири и прилегающих мелководьях Карского моря (A) (на основе космоснимка 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 с кратерами; 5 — контуры месторождений углеводородов; 6 — газопроводы (розовые) и нефтепроводы (зеленые); 7 — города и поселки; 8 — железная дорога Fig. 1. Map of the distribution of the Earth's degassing zones in the north of Western Siberia and adjacent shallow waters of the Kara Sea (A) (based on ESRI satellite image). Designations: 1 and 2 — zones with craters at the bottom of thermokarst lakes, rivers (1) and the Kara Sea (2); 3 — gas emission craters on land; 4 — Lake Otkrytiye with craters; 5 — contours of hydrocarbon fields; 6 — gas and oil pipelines (pink and green); 7 — cities and towns; 8 — railway

25]. К этим признакам относятся изменения альбедо поверхности воды (за счет отражения света в зоне выхода пузырей газа) и льда (связаны с включениями в нем пузырей газа, полыньями и пробоинами) [16; 20—23]. На мелководных (до 3—5 м) участках термокарстовых озер, рек и морей при прозрачной воде и отсутствии волнения на дне часто хорошо видны кратеры/покмарки, имеющие вид округлых углублений (затемненные зоны), нередко с брустверами выброшенной породы (светлые кольцевые формы, обрамляющие углубления) [16; 20—23]. У более старых кратеров брустверы отсутствуют из-за

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 powerful degassing zones with craters of gas blowouts from

Регион	Площадь, тыс. км²	токвг	ТОКВГ, зоны	Реки, зоны	Карское море, зоны	Всего зон
Полуостров Ямал	~118	3581	4951	94	797	5842
Гыданский полуостров	160	1044	1057	18	365	1440
Тазовский полуостров	70	102	283	0	112	395
Белый остров	1,9	9	9	27	70	106
Север Западной Сибири всего	~350	4736	6300	139	1344	7783
Полуостров Югорский	18	45	69	21	268	358
Таймыр (западное побережье)	2,0	9	12	0	0	12
Итого	~370	4790	6381	160	1612	8153

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

их размыва. Чаще всего наблюдаются не одиночные кратеры, а групповые, количество которых на крупных озерах может достигать многих сотен. Близко расположенные кратеры нередко объединяются и формируют углубления сложных конфигураций.

Крупные кратеры и неоднородности во льду наблюдаются в оптическом диапазоне частот по космоснимкам среднего разрешения, например Sentinel (10 м/пикс.), а также по данным радиолокационной съемки [23]. В основном используются зарубежные космоснимки высокого разрешения со спутников WorldView (WV-1, WV-2 и WV-3) и GeoEye (США), а также отечественные космоснимки со спутников «Ресурс-П» и «Канопус-В». Мониторинговые исследования изменений наиболее значимых крупных объектов осуществляются с применением широкого арсенала космоснимков разного разрешения, включая Sentinel-2. Также полезно использование радарных космоснимков с улучшенными показателями детальности (Sentinel-1 в режиме Spot) [23]. Наибольшее разрешение достигается благодаря аэрофотосъемке из вертолетов и БПЛА.

Во время многочисленных полетов на вертолетах в 17 экспедициях 2014—2024 гг. на полуострове Ямал авторы обнаружили и сфотографировали более 300 водоемов с различными признаками дегазации Земли, включая ТОКВГ и прямые выходы газа в воду с изменением альбедо [16; 17; 20—23]. Зафиксированные координаты объектов дегазации на основе GPS и/или ГЛОНАСС позволяют идентифицировать их на космоснимках для уточнения координат и внесения в геоинформационную систему «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО»), созданную и постоянно развиваемую около 20 лет в Институте проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН [16—23].

Для систематизации информации о зонах дегазации в ГИС «АМО» было принято считать обособленной зоной дегазации участок размером от 400 до 1000 м, на котором выявлена одна или группа покмарок, при этом протяженные (несколько километров) поля покмарок разделялись на несколько зон [16]. Расчет средней плотности распространения зон дегазации с кратерами выбросов газа был выполнен в программном обеспечении ArcGIS (ESRI, США) на базе осреднения 25 км² (5×5 км), как было принято ранее [16; 18]. Картографические построения были также выполнены в ArcGIS.

Результаты исследований

В настоящее время путем анализа аэрофотоснимков из вертолетов и космоснимков высокого разрешения на полуострове Ямал обнаружено 3581 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. В итоге на дне ТОКВГ Ямала выявлена 4951 зона дегазации. Кроме того, в береговых частях и руслах рек обнаружены еще 94 зоны дегазации. Таким образом. в пределах полуострова Ямал выделены и занесены в ГИС «АМО» 5045 зон дегазации. На полуостровах Гыданский и Тазовский обнаружены соответственно 1093 и 283 зоны дегазации. Относительно небольшое количество зон дегазации также обнаружено на водоемах полуострова Югорский (90) и острова Белый (36). В итоге на дне водоемов северной части Западной Сибири выделены и занесены в ГИС «АМО» 6439 зон дегазации (см. табл. 1 без полуострова Югорский). Кроме того, на начальном рекогносцировочном этапе анализа территории Таймыра вблизи его западного побережья, примыкающего к реке Енисей, выявлены 12 зон дегазации. Ниже приведен ряд примеров выделенных зон дегазации.

В качестве ярко выраженного иллюстративного примера обнаружения ТОКВГ по данным ДЗЗ приведем фрагмент космоснимка WV-3 6 августа 2023 г. небольшого безымянного озера (рис. 2А), расположенного в центральной части Ямала в 360 м от



Рис. 2. Космоснимок WV-3 6 августа 2023 г. термокарстового озера на полуострове Ямал с высокой плотностью кратеров (А) с увеличенным фрагментом (В)

Fig. 2. Satellite image WV-3 on August 6, 2023 of a thermokarst lake on the Yamal Peninsula with a high density of craters (A) with an enlarged fragment (B)

реки Сявтасё (координаты 69,274° N, 71,280° E). При весьма скромных размерах 380×485 м это озеро привлекает особое внимание огромным количеством покмарок (свыше 300), в основном сосредоточенных в его юго-западной части. Диаметры зафиксированных обособленных покмарок меняются от 1 до 17 м, а размер самой большой депрессии, образовавшейся, видимо, при слиянии трех кратеров, составляет 18×30 м. Площадь озера около 146,6 тыс. м², средняя плотность распространения покмарок — одна на 440 м², а в пределах увеличенного фрагмента рис. 2В — в среднем одна на участке 150 м² (одна на участке 12×12 м²). Кроме того, не вызывает сомнений наличие покмарок диаметром менее 1 м, уверенное выделение которых практически невозможно при размерах пикселя около 0,5 м. Обращает на себя внимание наличие брустверов у большинства покмарок, отображаемых светлыми частями самого дна. Отметим, что в соседних озерах также наблюдаются покмарки, но в меньшем на порядок количестве (до 10—30).

На основе данных ДЗЗ для рассматриваемого ТОКВГ были выполнены мониторинговые исследования даты образования покмарок, результаты которых в виде серии разновременных фрагментов космоснимков Sentinel-2 2019—2024 гг. приведены на рис. 3. На космоснимках 17 июля и 28 сентября 2019 г. на дне озера не наблюдается никаких следов потенциальной дегазации, однако 8 и 19 июня 2020 г. на юго-западной части дна озера видны покмарки, подобные приведенным на рис. 2. Ледовый

покров 6 и 8 июня 2020 г. на этом озере неоднороден, что, видимо, обусловлено первоочередным таянием участков с вмерзшими пузырями газа. Кроме того, 8 июня лед практически полностью растаял, хотя на соседних озерах он сохранился. В 2021-2024 гг. ситуация подобна 2020 г. Таким образом, можно считать доказанным, что большая часть подводных кратеров образовалась в зимний период 2019—2020 гг., видимо, после 18 октября 2019 г., но до 6 июня 2020 г., так как 6 и 8 июня возможное замутнение воды за счет выброшенного грунта отсутствует. Судя по наличию неоднородностей в покрове льда 15 июня 2021 г. и 6 июня 2023 г., выход газа со дна озера продолжался. При этом не наблюдается изменение конфигурации покмарок. Вызывает большой интерес факт очагового образования покмарок лишь в юго-западной части озера (см. рис. 2А), где глубина дна меньше, чем в северной и восточной его частях. Отметим, что выявленный участок покмарок зафиксирован в ГИС «АМО» как единая зона дегазации.

Сильные газопроявления обнаружены по данным ДЗЗ в южной части протяженного (около 1200 м) безымянного озера (рис. 4), находящегося в северной части Ямала (71,5636° N, 69,650° E) в районе слияния меандрирующих рек Сядоръяха и Хальмеръяха (эстуарий Сядоръяхи расположен на западном побережье полуострова). Рассматриваемое озеро имеет L-образную форму, в связи с чем оно было названо нами Серповидным. Возможно, это озеро по своей природе является старицей Сядоръяхи, бли-



Рис. 3. Мониторинг выбросов газа со дна термокарстового озера в 2019—2024 гг. на основе космоснимков Sentinel-2 Fig. 3. Monitoring of gas blowouts from the bottom of a thermokarst lake in 2019—2024 based on Sentinel-2 satellite images



Рис. 4. Космоснимки WV-2 10 июля 2020 г. (А) и WV-3 9 июля 2024 г. (С) южной части Серповидного озера на полуострове Ямал с увеличенными фрагментами (В и D) (база данных ESRI) Fig. 4. Satellite images WV-2 on July 10, 2020 (A) and WV-3 on July 9, 2024 (C) of the southern part of Lake Serpovidnoe on the Yamal

Peninsula with enlarged fragments (B and D) (ESRI database)

жайшая часть которой расположена от него всего в 12 м (см. рис. 4). Длина Серповидного озера достигает 1200 м, а ширина меняется от 60 до 175 м, что значительно (до трех раз) превышает ширину Сядоръяхи, видимо, за счет воздействия термокарстовых процессов. В летнее время на дне южной части озера обнаружено свыше 400 покмарок диаметром от 2,5 до 22 м (см. рис. 4А и 4В). На одном лишь увеличенном фрагменте В площадью около 56,6 тыс. м² обнаружено около 220 покмарок — в среднем одна на 257 м² (16×16 м). Очевидно, существует и множество покмарок диаметром менее 2,5 м, которые выделяются неоднозначно или не видны. Анализ архивных космоснимков Sentinel-2 позволяет сделать

Рис. 5. Космоснимок WV-2 5 сентября 2011 г. небольшого безымянного термокарстового озера на Гыданском полуострове (A) с увеличенным фрагментом (B) (база данных ESRI)

Fig. 5. Satellite image WV-2 of September 5, 2011 of a small unnamed thermokarst lake on the Gydan Peninsula (A) with an enlarged fragment (B) (ESRI database)

вывод, что большинство покмарок образовалось до 2017 г. и сохранилось до конца лета 2024 г. При этом их брустверы существенно размыты. Выявленный участок покмарок зафиксирован в ГИС «АМО» как две зоны дегазации.

В процессе таяния ледяного покрова Серповидного озера 9 июля 2024 г. (см. рис. 4С и 4D) в его южной части наблюдается множество (более 100) неоднородностей в его строении, обусловленных неравномерным плавлением льда из-за включений пузырей газа диаметром до 20 м. Судя по многочисленным включениям пузырей газа, к большинству покмарок приурочены активные сипы газа. Также отметим, что подобные газопроявления наблюдаются в ряде других близлежащих озер разного генезиса. Ледяной покров в северной части Серповидного озера, на дне которой покмарки не обнаружены, несравнимо более однороден — в нем есть лишь несколько небольших проталин.

Ha Гыданском полуострове обнаружено 1044 ТОКВГ, что в 3,4 раза меньше, чем на полуострове Ямал (см. табл. 1), имеющем в 1,36 раза меньшую площадь. Таким образом, плотность выявленных ТОКВГ на полуострове Гыданский примерно в 4,6 раза меньше, чем на Ямале, что видно на картографической схеме рис. 1. Однако, как и на Ямале, большинство ТОКВГ Гыданского полуострова характеризуются наличием на дне огромного количества кратеров-покмарок. Отчетливо наблюдается приуроченность ТОКВГ к руслам рек, положение которых, наиболее вероятно, обусловлено спецификой разломной тектоники.

На рис. 5 приведен космоснимок WV-2 небольшого безымянного ТОКВГ площадью 320,4 тыс. м² (размер 510×910 м) с многочисленными покмарками. Данное ТОКВГ расположено в западной части Гыданского полуострова вблизи реки Торамюяха (координаты 69,9485° N, 74,9388° E). На выделенном фрагменте озера (рис. 5В) площадью 93,6 тыс. м² (260×360 м) существует не менее 330 кратеров выбросов газа на дне. При этом средняя плотность распространения покмарок на участке В составляет одну на 284 м² (17×17 м), что примерно так же, как и на участке В приведенного выше Серповидного озера (16×16 м). Диаметры самых крупных покмарок достигают 18-24 м, а уверенно выделяемых мелких — 2—3 м. Многие покмарки, видимо, образовались недавно, так как выделяются наличием светлой окантовки не размытых брустверов выброшенного грунта. Покмарки расположены очень плотно, частично сливаясь с ранее образовавшимися. Отметим, что покмарки также наблюдаются на озерах, расположенных к северу и западу от рассмотренного выше озера (см. рис. 5).

В мелководных прибрежных частях Карского моря вокруг полуостровов Ямал и Гыданский (включая Обскую и Тазовскую губы) было найдено и внесено в ГИС «АМО» 797 и 365 зон дегазации, а около полуостровов Тазовский и Югорский — соответственно 112 и 268 (см. рис. 1А и табл. 1). Еще 70 зон дегазации найдено на острове Белый, включая северную часть пролива Малыгина (всего в этом проливе найдено около 50 зон, в том числе у побережья Ямала). Таким образом, в различных мелководных частях

Рис. 6. Космоснимок WV-2 15 июля 2018 г. (ESRI) мелководья Обской губы в юго-восточной части полуострова Ямала с кратерами выбросов газа (A) с тремя увеличенными участками (B, C, D). Fig. 6. WV-2 satellite image of July 15, 2018 (ESRI) of the shallow water of the Gulf of Ob in the sourtheastern part of Yamal Peninsula with pockmarks (A) with three enlarged areas (B, C, D).

акватории Карского моря обнаружено 1612 зон дегазации (см. табл. 1). Установлено, что эти зоны преимущественно сосредоточены в заливах, лиманах и бухтах, которые в различной степени защищены от крупных морских волн [16]. Их абсолютное большинство найдено на глубинах дна до 2 м, редко до 3-4 м. В незащищенном от штормов и волнового прибоя западном мелководье Ямала покмарки не выявлены, что вполне очевидно. В открытой части Карского моря покмарки были обнаружены вдоль северного побережья полуострова Югорский. В частности, группа покмарок была найдена 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.) [16].

В Обской губе обнаружены крупные районы дегазации, приуроченные к бухтам Маниха (см. [16]), Новый Порт, Каменная и др. В северной части бухты Новый Порт (67,697° N, 73,097° E) найдены крупные покмарки в 3-9 км к северо-западу от причала, расположенного в центре одноименного поселка. В 4,3 км южнее причала обнаружена группа покмарок диаметром 9—22 м (67,649° N, 72,926° Е), расположенная всего в 180-400 м к северу от подводного газопровода «Газ Ямала» ООО «Газпромнефть-Ямал» (длина подводного участка 58,4 км, пропускная способность — 20 млрд м³/год). По нему газ Новопортовского НГКМ с сентября 2021 г. транспортируется через Обскую губу на Тазовский полуостров в систему магистральных газопроводов «Ямбург — Тула». 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.

Особый интерес представляет анализ многочисленных неоднородностей дна, найденных с применением данных ДЗЗ в прибрежных частях бухты Каменная/Пэсаляванга (68,434° N, 73,563° E), имеющей субмеридиональную ориентацию, протяженность около 10 км и ширину до 4-5 км (рис. 6А). Бухта Каменная широко известна тем, что здесь на мысе Каменный (северная часть рис. 6А) расположена основная инфраструктура терминала «Ворота Арктики» ООО «Газпромнефть-Ямал», построенного в 2015 г. для круглогодичной отгрузки нефти Новопортовского НГКМ, начавшейся в мае 2016 г. При этом на расстоянии 3,5 км от берега на рейде установлен выносной нефтеналивной терминал башенного типа, на который нефть поставляется по двум трубопроводам. Кроме того, на косе Каменная размещено 14 резервуаров склада горюче-смазочных материалов (см. рис. 6В).

По приведенному космоснимку (см. рис. 6В) видно, что на отмели бухты Каменная вблизи от резервуаров наблюдаются многочисленные крупные (до 24×32 м) покмарки, ближайшие из которых расположены всего в 120—150 м от резервуаров. При этом расстояния между покмарками меняются от 50 до 150 м. Подобные группы покмарок расположены практически вдоль всего побережья бухты. В частности, они есть в секторах С и D (см. рис. 6), преобладающие расстояния между кратерами 50—100 м. Во многих случаях форма крате-

Рис. 7. Космоснимок GeoEye-1 8 июня 2020 г. (ESRI) восточного берега Тазовской губы (A) с увеличенными фрагментами (B и C) Fig. 7. GeoEye-1 satellite image on June 8, 2020 (ESRI) of the eastern coast of the Taz Bay (A) with enlarged fragments (B and C)

ра существенно отличается от окружности, бывает не только эллиптической, но даже щелевидной и с неровными (рваными) краями. Предположительно это объясняется преимущественно глинистым и/или песчано-глинистым составом донного грунта, разрываемого газовым выбросом.

Проведенный мониторинг изменений покмарок в бухте Каменная за 8 лет 2017—2024 гг. на основе космоснимков Sentinel-2 наглядно свидетельствует о существенных ежегодных изменениях. На новых и старых местах периодически появляются и взрываются бугры пучения, некоторые покмарки замываются осадками, а другие, видимо, постоянно обновляются новыми газогидродинамическими событиями. Подобные события были зафиксированы и в бухте Маниха.

В Тазовской губе по данным ДЗЗ также обнаружен ряд крупных районов существования покмарок. Самый крупный из них выявлен по космоснимку GeoEye-1 у правого побережья Тазовской губы на глубинах до 2 м (68,893° N, 77,621° E) (рис. 7). Особенностью этого района является наличие огромного количества бугров пучения на разных стадиях развития (см. рис. 7С). На отдельных участках бугры пучения и покмарки имеют хаотичное распространение (см. рис. 7В), а в других они формируют протяженные цепочки (рис. 7С). Максимальные размеры покмарок достигают 25 м, но чаще всего 15—17 м.

В самой северной части исследованного региона многочисленные покмарки и бугры пучения были обнаружены в мелководных частях Карского моря вблизи островов Шокальского, Оленьего, Вилькицкого, Неупокоева и Сибирякова (см. рис. 1), которые в статистическом плане в табл. 1 были отнесены к зонам Карского моря у Тазовского полуострова. Необходимо отметить, что генезис не всех бугров пучения и покмарок понятен. Весьма вероятно, что на островах часть выявленных бугров пучения имеет сезонный криогенный характер.

В итоге исследований территории севера Западной Сибири и прилегающих акваторий Карского моря построена картографическая схема плотности распространения зон выбросов газа, приведенная на рис. 8.

Обсуждение результатов

Комплексный региональный анализ построенных картографических схем распространения кратеров/покмарок выбросов газа на дне водоемов, приведенных на рис. 1 и 8, однозначно свидетельствует о неравномерном очаговом характере распространения выявленных зон интенсивной дегазации Земли. Наблюдается явная приуроченность многих зон дегазации к термокарстовым озерам в долинах рек, которые, в свою очередь, могут быть приурочены к глубинным разломам. Наиболее сильная Нейтинско-Сеяхинская зона дегазации совпадает с центральной частью Ямальского грабен-рифта с активными разломами. На локальных уровнях в пределах многих термокарстовых озер и рек также наблюдается очаговый характер распространения покмарок, который невозможно объяснить только выходом газа микробиального генезиса, образующегося на всей площади придонных осадков in situ (см. рис. 2).

Для северной части Западной Сибири максимальное количество зон дегазации обнаружено на полуострове Ямал с прилегающим мелководьем

Рис. 8. Картографическая схема плотности распространения зон дегазации Земли на севере Западной Сибири и прилегающих акваториях Карского моря (картографическая основа — ESRI). Обозначения: 1 — кратеры выбросов газа на суше, 2 — озеро Открытие с кратерами, 3 — контуры месторождений углеводородов, 4 — газопроводы (розовые) и нефтепроводы (зеленые), 5 — города и поселки, 6 — железная дорога

Fig. 8. Map of the distribution density of the Earth's degassing zones in the north of Western Siberia and the adjacent waters of the Kara Sea (based on ESRI). Designations: 1 - gas blowout craters on land, 2 - Lake Otkrytiye with craters, 3 - contours of hydrocarbon fields, 4 - gas and oil pipelines (pink and green), 5 - cities and towns, 6 - railway

Карского моря — 5842 (75,1% общего количества в табл. 1). Вероятно, это обусловлено тем, что именно на Ямале расположено наибольшее число термокарстовых озер. При этом согласно рис. 8 самая высокая плотность распространения зон дегазации выявлена в центральной части Ямала вблизи побережья Обской губы в Нейтинско-Сеяхинском районе (33 и 36 зон на 25 км²), а также в Сабеттинском районе (20 и 22 зоны). Ранее нами было показано, что в Нейтинско-Сеяхинской зоне по данным спектрометра TROPOMI обнаружена повышенная концентрация метана в атмосфере [26]. Этот самый крупный район дегазации совпадает с центральной частью Ямальского грабен-рифта с активными разНа Гыданском полуострове с прилегающим мелководьем Карского моря обнаружено 1440 зон дегазации, что в четыре раза меньше, чем на Ямале. Экстремальный район дегазации (16 зон на 25 км²) расположен вблизи правого берега Тазовской губы на площади крупного Антипаютинского газового месторождения (отображен на рис. 7). Второй по значимости район дегазации (16 зон) обнаружен в 35 км к северу от поселка Утренний на широте поселка Сабетта. Весьма вероятно, что он приурочен к Сабеттинской экстремальной зоне Ямала.

На Тазовском полуострове максимальная плотность дегазации выявлена в северной части Уренгойского НГКМ (14 зон на 25 км²), а также у его восточной границы на территории Самбургского НГКМ, открытого в 1974 г. и разрабатываемого с 2012 г. (12 зон на 25 км²). Эта зона является первой на севере Западной Сибири, где были открыты ТОКВГ во время экспедиций в 1969—1971 гг. [24]. По данным И. Л. Кузина, в ряде озер севера Западной Сибири наблюдались газопроявления, а на дне были выявлены «...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 содержанием тяжелых углеводородов до 0,06%», что свидетельствует о выходе глубинного газа [24]. При этом повторные исследования этих ТОКВГ показали появление новых покмарок (воронок).

Необходимо отметить, что на всех этапах 12-летнего изучения ТОКВГ и других зон дегазации на севере Западной Сибири основные первоначальные выводы полностью сохранили актуальность, несмотря на значительное увеличение количества зон и детализации картографической схемы плотности распространения зон дегазации. В частности, в 2020 г. на Ямале и прилегающих акваториях Карского моря их было выделено 1860 [26], а в начале 2025 г. — 5842 (см. табл. 1), т. е. количество увеличилось в 3,14 раза. Выявленная ранее закономерность сохранилась: Нейтинско-Сеяхинский и Сабеттинский районы являются наиболее газовзрывоопасными по выбросам газа со дна водоемов. В последние годы увеличивается количество исследователей ТОКВГ [27].

Обнаружена закономерность приуроченности большей 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 [28]. Кроме того, озера в речных долинах могут иметь повышенное содержание в осадочных отложениях палеорусел органики, генерирующей бактериальный газ in situ, но это положение не является основным, так как на дне множества аналогичных озер нет явных признаков дегазации. Весьма вероятно, что обособленные крупные участки взрывной дегазации связаны с диссоциацией криогенных газогидратов.

В ряде случаев опасные зоны интенсивной дегазации Земли расположены в непосредственной близости от объектов инфраструктуры нефтегазовых комплексов. В частности, ряд опасных ТОКВГ обнаружен на разрабатываемом ОАО «Ямал СПГ» (ПАО «НОВАТЭК» с зарубежными партнерами) Южно-Тамбейском НГКМ.

Зоны активной дегазации из ТОКВГ обнаружены на разных участках Бованенковского НГКМ, в том числе в кратерном водоеме аварийной скважины Бованенковская-118 [20] и на ряде соседствующих озер, включая самое крупное озеро Тиртято. На всех этих озерах в весеннее время в тающем льду наблюдаются многочисленные полыньи, образование которых связано с ранним оттаиванием льда в зонах скоплений пузырей газа, выходящих со дна озер и вмерзших в зимний период в лед. Также видны и концентрические трещины, образовавшиеся из-за ударного воздействия пневматическими выхлопами/взрывами газа. При этом близко к берегу этих озер расположены кусты газодобывающих скважин 110, 113, 114 и др.

Как мы отмечали ранее [16], 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 угрожает стабильному положению заглубленных в грунт подводных трубопроводов, что может приводить к их всплытию. Весьма вероятно, что именно это послужило причиной всплытия участков двух линий подводного газопровода «Бованенково — Ухта» в 2018 и 2019 гг. общей протяженностью около 9,2 км [16]. Обоснованием сказанному выше является факт обнаружения вблизи этих участков около побережья Ямала множества покмарок, которые могут быть также на больших глубинах, недоступных визуальному анализу по космоснимкам. Также отметим, что мощные взрывы/выхлопы газа с образованием кратеров могут привести к локальному повреждению герметичности трубопроводов с возникновением аварийных и даже катастрофических ситуаций.

Заключение

Современные данные аэрокосмических наблюдений позволяют решать широкий круг задач, связанных с изучением потенциально опасных объектов и районов мощной дегазации Земли, проявляющейся в виде изменения альбедо водной поверхности, наличия неоднородностей льда и кратеров/покмарок на мелководном дне термокарстовых озер, рек и акваторий Северного Ледовитого океана.

В итоге комплексных аэрокосмических исследований в северной части Западной Сибири на дне 4736 термокарстовых озер и 29 рек обнаружено 6439 зон мощной дегазации Земли (выбросы/взрывы газа) в виде кратеров (покмарок). Кроме того, в прилегающих прибрежных зонах Карского моря выявлены еще 1344 зоны взрывной дегазации преимущественно в губах, заливах, лиманах и бухтах. С учетом полуостровов Югорский и Таймыр всего в регионе исследований найдены 8153 зоны взрывной дегазации, включая 1612 в прибрежных частях Карского моря. Подтверждена ранее установленная закономерность приуроченности большей части термокарстовых озер с кратерами выбросов газа к речным долинам. Подтверждены ранее сделанные выводы, что Нейтинско-Сеяхинский и Сабеттинский районы являются наиболее газовзрывоопасными.

Комплексный региональный анализ построенных картографических схем распространения кратеров/ покмарок выбросов газа на дне водоемов северной части Западной Сибири однозначно свидетельствует о неравномерном характере распространения выявленных зон интенсивной дегазации Земли. Наблюдается явная приуроченность многих зон дегазации к термокарстовым озерам в долинах рек, которые, в свою очередь, могут быть приурочены к глубинным разломам. Наиболее крупный Нейтинско-Сеяхинский район дегазации совпадает с центральной частью Ямальского грабен-рифта с активными разломами, а Сабеттинский район приурочен к Южно-Тамбейскому месторождению. На локальных уровнях в пределах многих термокарстовых озер и рек также наблюдается неравномерность (очаговость) интенсивной дегазации, которую невозможно объяснить выходом газа микробиального генезиса, образующегося на всей площади придонных осадков in situ. Особенно крупные очаги дегазации, видимо, имеют связь с миграцией глубинного газа и/или диссоциацией газогидратов.

Широко распространенные на севере Западной Сибири и прилегающей мелководной акватории Карского моря 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. При этом могут возникнуть значительные экономические и репутационные риски, угрожающие национальной безопасности России.

Финансирование

Работа выполнена по госзаданию ИПНГ РАН по теме «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения ресурсов углеводородов шельфа и сопредельной суши арктических и субарктических регионов России в условиях меняющегося климата» (№ 125020501403-7).

Благодарность

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

Литература/References

1. Трофимук А. А. Сорок лет борения за развитие нефтегазодобывающей промышленности Сибири. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. — 369 с.

Trofimuk A. A. Forty years of struggle for the development of the oil and gas production industry of Siberia. Novosibirsk, Publish. House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1997, 369 p. (In Russian).

2. Брехунцов А. М., Монастырев Б. В., Нестеров И. И. Закономерности размещения залежей нефти и газа Западной Сибири // Геология и геофизика. — 2011. — Т. 52, № 8. — С. 1001—1012.

Brekhuntsov A. M., Monastyrev B. V., Nesterov I. I. Regularities of the distribution of oil and gas deposits in Western Siberia. Geology and Geophysics, 2011, vol. 52, no. 8, pp. 1001—1012. (In Russian).

3. Скоробогатов В. А., Строганов Л. В., Копеев В. Д. Геологическое строение и газонефтеносность Ямала. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. — 352 с. Skorobogatov V. A., Stroganov L. V., Kopeev V. D. Geological structure and gas and oil potential of Yamal. Moscow, OOO Nedra-Business Center, 2003, 352 p. (In Russian).

4. Карта мощности и строения толщ ММП Западно-Сибирской плиты / Гл. ред. В. Т. Трофимов, В. В. Баулин. — М.: Главтюменьгеология; МГУ; ПНИИИС, 1984. — 1 л.

Map of the thickness and structure of permafrost strata of the West Siberian Plate. Eds. V. T. Trofimov, V. V. Baulin. Moscow, Glavtyumengeologiya; Moscow State University; PNIIIS, 1984. 1 p. (In Russian).

5. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. — Т. 2: Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / Ред. Ю. В. Баду, Н. А. Гафаров, Е. Е. Подборный. — М.: ООО «Газпром экспо», 2013. — 424 с.

Cryosphere of oil and gas condensate fields of the Yamal Peninsula. Vol. 2. Cryosphere of the Bovanenkovo oil and gas condensate field. Eds. Yu. V. Badu, N. A. Gafarov, E. E. Podborny. Moscow, OOO Gazprom Expo, 2013. 424 p. (In Russian).

6. Баду Ю. Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи. — М.: Науч. мир, 2018. — 232 с.

Badu Yu. B. Cryogenic thickness of gas-bearing structures of Yamal. On the influence of gas deposits on the formation and development of cryogenic thickness. Moscow, Scientific World, 2018, 232 p. (In Russian). 7. Якушев В. С., Перлова Е. В., Махонина Н. А. и др. Газовые гидраты в отложениях материков и островов // Журн. Рос. хим. об-ва. — 2003. — Т. 47, № 3. — С. 80—90.

Yakushev V. S., Perlova E. V., Makhonina N. A. et al. Gas hydrates in sediments of continents and islands. J. of the Russian Chemical Society, 2003, vol. 47, no. 3, pp. 80—90. (In Russian).

8. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИГАЗ, 2009. — 192 с.

Yakushev V. S. Natural gas and gas hydrates in the cryolithozone. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (In Russian).

9. Чувилин Е. М., Перлова Е. В., Баранов Ю. Б. и др. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. — М.: ГЕОС, 2007. — 137 с.

Chuvilin E. M., Perlova E. V., Baranov Yu. B., Kondakov V. V., Osokin A. B., Yakushev V. S. Structure and properties of rocks in the cryolithozone of the southern part of the Bovanenkovo gas condensate field. Moscow, GEOS, 2007, 137 p. (In Russian).

10. Чувилин Е. М., Гребенкин С. И., Сакле М. Влияние влагосодержания на газопроницаемость песчаных пород в мерзлом и талом состояниях // Криосфера Земли. — 2016. — Т. 20, № 3. — С. 71—78. — DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-3(71-78).

Chuvilin E. M., Grebenkin S. I., Sakle M. Effect of moisture content on gas permeability of sand rocks in frozen and thawed states. Earth's Cryosphere, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 71–78. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-3(71-78). (In Russian).

11. Biskaborn B. K., Smith S. L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at a global scale. Nature Communications, 2019, vol. 10, pp. 264.

12. Saunois M., Stavert A. R., Poulter B. et al. The Global Methane Budget 2000—2020. Earth System Science Data, 2024, pp. 1—146. Available at: https://doi. org/10.5194/essd-2024-115.

13. Бондур В. Г., Голицын Г. С., Мохов И. И. и др. Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты. — М.: Рос. акад. наук, 2022. — 388 с.

Bondur V. G., Golitsyn G. S., Mokhov I. I. et al. Methane and climate change: scientific problems and technological aspects. Moscow, Russian Academy of Sciences, 2022, 388 p. (In Russian).

14. Сергиенко В. И., Лобковский Л. И., Шахова Н. Е. 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.

Sergienko V. I., Lobkovskiy L. I., Shakhova N. E. et al. Degradation of underwater permafrost and degradation of hydrates of the Eastern Arctic Shelf seas as a possible cause of a "methane catastrophy": some results of complex research in 2011. Dokl. Akad. nauk, 2012, vol. 446, no. 3, pp. 330—335. (In Russian). 15. Анисимов О. А., Кокорев В. А. Сравнительный анализ наземных, морских и спутниковых измерений метана в нижней атмосфере российской части Арктики в условиях изменения климата // Исслед. Земли из космоса. — 2015. — № 2. — С. 1—14.

Алізітоv О. А., Kokorev V. A. Comparative Analysis of the Land, Marine and Satellite Observations of Methane in the Lover Atmosphere in the Russian Arctic under the Conditions of the Changing Climate. Earth Research from Space, 2015, no. 2, pp. 1—14. (In Russian). 16. 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.

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).

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

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

18. 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).

19. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Мониторинг развития Дуплетного объекта взрыва газа С22 на полуострове Ямал по данным дистанционного зондирования Земли // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 320—333.

Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Development monitoring of the C22 gas blowout Doublet object on Yamal peninsula using remote sensing data. Arctic: Ecology and Economy, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 320—333. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-320-333. (In Russian).

20. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Кишанков А. В. Геофизические методы обеспечения технологического суверенитета и национальной безопасности России в Арктике // Вестн. РАН. — 2024. — Т. 94, № 10. — С. 896—914. — DOI: 10.31857/S0869587324100055.

Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kishankov A. V. Geophysical methods of ensuring technological sovereignty and national security of Russia in the Arctic. Herald of the Russian Academy of Sciences, 2024, vol. 94, no. 10, pp. 32-46. DOI: 10.31857/ S08695873241005e6.

21. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования выбросов газа на термокарстовых озерах // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 2 (34). — С. 31—47.

Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N., Nikonov R. A., Sizov O. S. Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the thermokarst lakes gas eruption. Arctic: Ecology and Economy, 2019, no. 2 (34), pp. 31—47. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47. (In Russian).

22. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В., 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. Remote detection of areas of surface gas shows and gas emissions in the Arctic: Yamal Peninsula. Arctic: Ecology and Economy, 2016, no. 3 (23), pp. 4—13. (In Russian).

23. 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 Earth degassing in the Arctic: Yamal Peninsula, Lake Neito. Arctic: Ecology and Economy, 2018, no. 2 (30), pp. 83—93. (In Russian).

24. *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. 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).

25. 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.

Bondur V. G., Kuznetsova T. V. Identification of gas seeps in the waters of the Arctic seas using remote sensing data. Earth Research from Space, 2015, no. 4, pp. 30—43. (In Russian).

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

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

27. 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).

28. 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.

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

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: vib@ipng.ru.

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

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

EXPLOSIVE DEGASSING OF THE EARTH IN THE NORTH OF WESTERN SIBERIA: LAND AND COASTAL PARTS OF THE 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 in the north of Western Siberia: land and coastal parts of the Kara Sea. Arctic: Ecology and Economy, 2025, vol. 15, no. 2, pp. 162—176. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-162-176. (In Russian).

The article was received on February 17, 2025

Abstract

It has been substantiated that remote sensing (RS) data gives possibility for successful study of hazardous objects of explosive degassing of the Earth. As a result of comprehensive RS studies, 7,783 explosive degassing zones have been discovered in the northern part of Western Siberia, including 6,300 at the bottom of 4,736 thermokarst lakes, 139 at the bottom of 29 rivers, and 1,344 in shallow water areas of the Kara Sea. The largest Neyto-Seyakha degassing area coincides with the central part of the Yamal graben rift, and the Sabetta area is confined to the South Tambeyskoye field. Intensive degassing zones have also been discovered in the northern part of the Mutny Bay, in the Ob and Taz Bays of the Kara Sea. Large degassing centers are apparently associated with subvertical migration of deep gas along permeable faults and/or dissociation of gas hydrates during the growth of taliks on lakes and rivers that do not freeze to the bottom.

Keywords: Western Siberia, Yamal, Kara Sea, explosive degassing of the Earth, heaving mound, 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 «Increasing the efficiency and ecological safety of hydrocarbon resources development of the shelf and adjacent land of the Russian Arctic and Subarctic regions in conditions of changing climate» (No. 125020501403-7).

Acknowledgements

The authors are grateful to the Government of the Yamal-Nenets Autonomous District, Gazprom PJSC, NO-VATEK 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: vib@ipng.ru.

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

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

© Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., 2025