

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЙ РОСТ И ВЗРЫВ БУГРА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПУЧЕНИЯ С19 НА ПОЛУОСТРОВЕ ЯМАЛ В 2020 ГОДУ

В. И. Богоявленский¹, И. В. Богоявленский¹, Р. А. Никонов¹, В. Н. Полозов², А. Б. Осокин²

¹ Институт проблем нефти и газа РАН (Москва, Российская Федерация)

² ООО «Газпром добыча Надым» (Надым, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 25 мая 2026 г.

Для цитирования

Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. и др. Экстремальный рост и взрыв бугра газодинамического пучения С19 на полуострове Ямал в 2020 году // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 3. — С. 361—373. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-3-361-373.

На основе анализа космоснимков в комплексе с нормализованным дифференцированным вегетационным индексом NDVI определено, что взрыв многолетнего бугра газодинамического пучения С19 на полуострове Ямал произошел в период с 24 сентября по 5 октября 2020 г. В результате мониторинга его развития на основе цифровой модели рельефа ArcticDEM установлено, что в предшествующий взрыву и образованию кратера год (2019–2020 гг.) произошел экстремальный рост центральной и северной частей бугра со среднегодовыми скоростями около 54 и 67 см/год, что в 4,0–4,9 раза выше, чем на начальном этапе мониторинга в 2013–2016 гг. В методическом плане для повышения надежности прогноза грядущих взрывов потенциальных бугров газодинамического пучения рекомендуется проводить ежегодный мониторинг их развития в летние периоды наиболее идентичного фенологического состояния растительности.

Ключевые слова: Арктика, полуостров Ямал, Восточно-Бованенковское месторождение, многолетнемерзлые породы (ММП), многолетние бугры пучения (МБП), выбросы газа, кратеры, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), цифровая модель рельефа (ЦМР), ArcticDEM.

Введение

Глобальное климатическое потепление, особенно сильно проявляющееся в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ), включая северную часть Западной Сибири с полуостровом Ямал, активизирует деградацию многолетнемерзлых пород (ММП) [1–3], порождающую серьезные проблемы для жизнедеятельности человека в Арктике, включая освоение месторождений полезных ископаемых. Среди этих проблем особо выделим ухудшение несущей способности приповерхностных грунтов и усиление процессов дегазации Земли за счет ухудшения

экранирующих свойств ММП на пути субвертикальной миграции газа и диссоциации газогидратов, находящихся в метастабильном состоянии [4–6]. Это способствует активизации газодинамических процессов, в том числе во взрывной форме при мощных выбросах газа из ММП [7–9].

На севере Западной Сибири образовалось множество привлекающих всеобщее внимание гигантских кратеров, включая впервые обнаруженные на полуострове Ямал в 2014 г. южнее Бованенковско-го нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) кратеры С1 и С2 [7–26] (здесь и далее приводится индикация кратеров в геоинформационной системе «Арктика и Мировой океан» — ГИС «АМО» ИПНГ РАН). Проведенные 12-летние исследования Инсти-

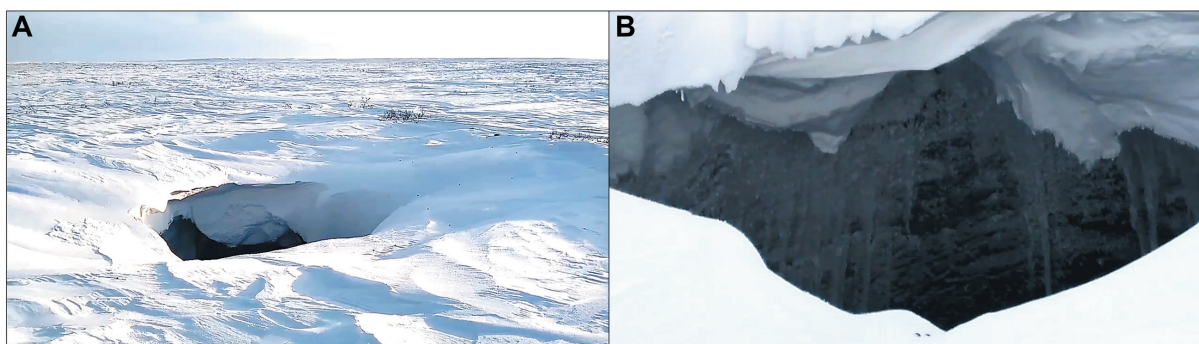


Рис. 1. Вид кратера и подземной полости объекта С19 с краев бруствера (А) и провала (В) (скриншоты видео С. Окоетто 23 марта 2021 г.)

Fig. 1. View of the crater and underground cavity of the C19 object from the edges of the parapet (A) and the collapse (B) (screenshots from the video by S. Okotetto, March 23, 2021)

тута проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН позволили подтвердить впервые сформулированный [7] газодинамический генезис формирования многолетних бугров пучения (МБП) в кровле газонасыщенных термокарстовых полостей, образующихся в массивах подземного льда под действием эндогенных и экзогенных факторов [8—17].

Полуостров Ямал характеризуется высокой газонасыщенностью осадочной толщи [27—28]. Суммарные начальные запасы газа близкорасположенных Бованенковского, Харасавэйского и Круzenштернского месторождений составляют около 9 трлн м³ [16]. На флагманском в Ямальском центре газодобычи Бованенковском НГКМ промышленная добыча газа началась в 2012 г., а 20 апреля 2026 г. накопленный объем его добычи достиг 1 трлн м³¹. В 2026 г. начнется промышленная добыча газа на Харасавэйском ГКМ (открыто в 1974 г.), частично расположенном под дном Карского моря. Высокой, но недостаточно изученной газонасыщенностью характеризуется верхняя часть разреза, в которой в ММП широко распространены массивы подземного льда [29—32]. При этом газ существует в свободном и гидратном состояниях, включая газогидраты в метастабильном состоянии [4; 5; 17; 29].

Большинство кратеров выбросов газа обнаружено в районе уникального по запасам газа (около 4,9 трлн м³) Бованенковского НГКМ [17; 27; 28]. Вокруг кратеров на удалениях до нескольких сотен метров наблюдаются многочисленные следы падения кусков мерзлого грунта и ледогрунта, иногда в виде ударных (импактных) структур кратерного вида с выброшенным приповерхностным талым грунтом, что особенно сильно проявилось при мощном взрыве на объекте С2 в 2012 г. [10; 15; 17; 22; 24]. Во всех пяти случаях выбросов газа из разорвавшихся МБП (С3, С9, С11, С21 и С23), зафиксированных местным на-

селением, подтверждаются его самовоспламенения и взрывы, что значительно усиливает угрозы взрывной дегазации [8—17].

Дополнительно отметим, что на основе комплексного анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса на полуострове Ямал и прилегающей части Карского моря, включая Обскую губу, обнаружены 5842 зоны взрывной дегазации, в том числе 4951 зона на дне 3581 термокарстового озера и 891 зона на дне рек и мелководья Карского моря [33]. Самыми крупными районами дегазации являются Нейтинско-Сеяхинский (приурочен к Ямальскому грабен-рифту), Сабеттинский (Южно-Тамбейское месторождение) и малоизученный залив Мутный Карского моря. Предполагается, что наиболее крупные районы дегазации связаны с субвертикальной миграцией газа по проницаемым разломам и/или с диссоциацией газогидратов в процессе развития таликов на непромерзающих до дна водоемах [33]. Очевидно, что выявленные крупные районы дегазации представляют интерес при комплексных исследованиях перспектив нефтегазоносности не только верхней части разреза (ВЧР — глубины до 500—900 м), но и более глубоких горизонтов.

Вышеперечисленные явления свидетельствуют о высоком уровне опасности газодинамических процессов, угрожающих инфраструктуре крупнейших отечественных нефтегазовых промыслов и других объектов жизнедеятельности человека в АЗРФ и на шельфе Ледовитого океана, в совокупности несущих серьезные потенциальные угрозы национальной безопасности России [17].

23 марта 2021 г. представитель коренного населения Михаил Окоетто информировал нас, что Степан Окоетто, проезжая на снегоходе по заснеженной тундре в центральной части полуострова Ямал вблизи реки Ябто-Яха, обнаружил крупный провал, края которого были частично занесены снегом, нависающим над огромной подземной полостью. На рис. 1 приведены скриншоты видеосъемки, сделанные С. Окоетто с края бруствера

¹ На Бованенковском месторождении добыт первый триллион кубометров природного газа. — Газпром. — 20 апр. — URL: <https://www.gazprom.ru/about/subsidiaries/news/2026/april/article584111/>.

(А) и непосредственно около обрыва провала (В). Данный объект подобен ряду ранее исследованных кратеров выбросов газа [7—26], в связи с чем он был зарегистрирован в ГИС «АМО» с очередным индексом С19.

Основной целью данной работы является проведение исследований ранее неизвестного научному сообществу мощного выброса газа на объекте С19, образовавшемся в пределах Восточно-Бованенковского НГКМ, на основе экспедиционных работ «Ямал-2021» ИПНГ РАН в августе 2021 г. в комплексе с данными ДЗЗ из космоса.

Методы дистанционных исследований

Потенциально газозрывоопасные объекты исследуются на основе обработки и анализа комплекса данных ДЗЗ из космоса, включая космоснимки высокого разрешения (например, WorldView (WV), GeoEye, QuickBird, Ресурс-П и Канопус-В), а также среднего разрешения (Sentinel и Landsat), позволяющие проводить ретроспективный анализ состояния исследуемых объектов [10—17]. Важные результаты получаются на основе цифровых моделей рельефа (ЦМР) ArcticDEM, созданных в Полярном геопространственном центре PGC (Polar Geospatial Center) Университета Миннесоты при фотограмметрической обработке космоснимков высокого разрешения (0,32—0,5 м), при этом начиная с 2018 г. 3D-модели имеют разрешение 2 м/пикс. [34; 35]. Особенности использования ЦМР ArcticDEM при изучении ряда объектов выбросов газа на Ямале (С1, С2, С11, С15, С17, С22, С23 и др.) описаны в [10—16].

В ряде случаев полезен нормализованный дифференцированный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), несущий информацию об аномальных изменениях растительности и рассчитываемый в том числе по данным спутника Sentinel-2 [24]. Индекс представляет собой разность ближнего инфракрасного и красного каналов, поделенную на их сумму. Такая комбинация характеризует содержание хлорофилла в растениях и показывает области наличия или отсутствия растительности. На картах NDVI, характеризующих состояние растительного покрова тундры, аномально низкими значениями индекса отчетливо выделяется нарушенная взрывом поверхность земли в месте образования кратера, на которой растительность отсутствует.

Важные результаты при изучении целевых локальных объектов получаются на основе фотограмметрической обработки аэрофотоснимков с БПЛА [11—17]. В качестве БПЛА успешно используется квадрокоптер DJI Mavic Pro (DJI, Китай) с камерой Ultra HD «Mavic Pro» высокого разрешения (12,35 Мп) со стабилизатором [36]. Цифровая фотограмметрическая обработка аэрофотоснимков в основном проводится в программном обеспечении (ПО) Agisoft Metashape Professional (Agisoft

LLC, ГК «Геоскан», Россия) [37], зарекомендовавшем [15; 16] себя лучше ПО Pix4Dmapper (Pix4D SA, Швейцария) [38].

Эхолокация дна кратерного озера С19 проводилась с надувной лодки с применением хорошо себя зарекомендовавшего портативного беспроводного двухлучевого эхолота «Deeper Smart Sonar Pro+» (UAB, Литва), работающего в глубинном диапазоне 0,5—80 м с возможной фиксацией процесса дегазации. Данный эхолот позволяет получать информацию и просматривать первичные результаты с портативных устройств с операционной системой iOS или Android, а также выгружать информацию в формате .csv или .xls и хранить ее на облачных серверах.

Картографические изображения, графические построения 3D/4D-моделей, сохранение и развитие базы данных (Big Data) осуществляются с применением ПО геоинформационной системы ArcGIS (ESRI, США) [39]. Более подробно со спецификой обработки данных можно познакомиться в работах авторов [11; 12].

Краткое геолого-географическое описание района работ

Анализ космоснимка со спутника Канопус-В 17 марта 2021 г. позволил обнаружить кратер С19 и выявить его приуроченность к Восточно-Бованенковскому НГКМ. Кратер С19 (70,72294° N, 69,23321° E) расположен в центральной части полуострова Ямал на высоте около 50 м над уровнем моря в 68,7 км восточнее залива Шарапов Шар Карского моря, в 3,2 км северо-восточнее реки Харасавэйя (Харасавэй-Яха — в переводе с ненецкого языка «извилистая река» — впадает в пролив Шарапов Шар) и находится в 910 м южнее реки Ябто-Яха (Ябтояха — «гусиная река») (рис. 2). Относительно Бованенковского НГКМ он расположен в 26,4 км к северо-востоку в пределах Восточно-Бованенковского НГКМ. Объект С19 находится в 43,5 км северо-восточнее от ближайшего ранее исследованного объекта выброса газа С17 [12].

Согласно данным ДЗЗ, включая космоснимки и ЦМР ArcticDEM (см. рис. 2), район расположения кратера С19 характеризуется чередованием возвышенностей морских террас с проявлениями термоденудационных процессов и низменных частей с речной системой и редкими небольшими (до 560×750 м) термокарстовыми озерами (см. рис. 2А и 2В). По данным ДЗЗ заозеренность района Восточно-Бованенковского НГКМ несравнимо ниже, чем в пределах Бованенковского НГКМ. Отметим, что при подготовке ЦМР ArcticDEM (см. рис. 2В) была проведена ее увязка с цифровыми топографическими картами ГосГисЦентра (<https://gis-lab.info/forum/viewtopic.php?t=7779>), при этом вертикальная и горизонтальная поправки достигли 10 и 4,5 м.

Небольшое по запасам газа Восточно-Бованенковское НГКМ было открыто в 1983 г. поисковой скважиной № 1 (см. рис. 2), расположено в 9 км

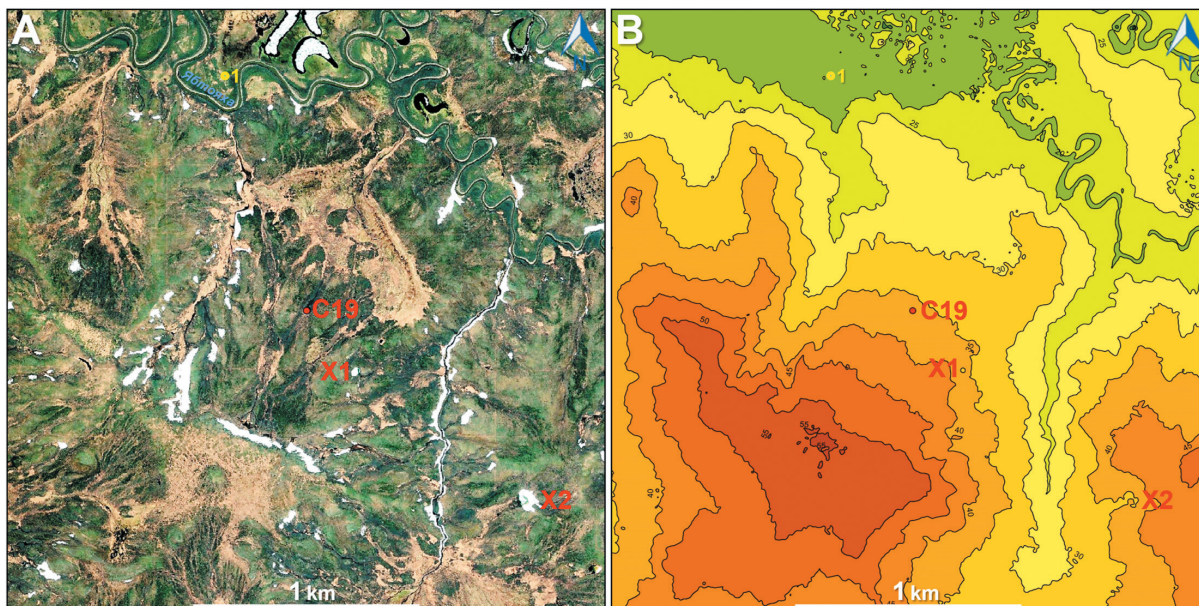


Рис. 2. Расположение объекта C19 на основе космоснимка WV-2 4 июля 2024 г. (ESRI) (A) и ЦМР ArcticDEM на основе WV-1 21 августа 2020 г. (B) с двумя подобными объектами (X1 и X2)

Fig. 2. Location of the C19 object based on a WV-2 satellite image on July 4, 2024 (ESRI) (A) and a digital elevation model ArcticDEM derived from WV-1 data on August 21, 2020 (B), along with two similar objects (X1 and X2)

восточнее северной части Бованенковского НГКМ, а всего было пробурено 7 поисково-разведочных скважин [27; 28]. По данным сейсморазведки размеры сеноманской залежи составляют 5×8,5 км, а по нижележащим продуктивным горизонтам залежи увеличиваются до 8×24 км. В 2021 г. ПАО «Газпром» выиграло конкурс на право недропользования в пределах участка площадью 3217 км² с Восточно-Бованенковским и Северо-Бованенковским НГКМ, на которых по состоянию на 2021 г. суммарные запасы газа были оценены² по категориям C1+C2 в 6,2+13,1 млрд м³, а ресурсы газа по категории D1 — около 331 млрд м³. Кроме того, имеются ресурсы категории D1 нефти — 5,8 млн т и конденсата — 21,7 млн т. В 2024 г. были проведены сейсморазведочные работы 3D. Предполагается, что после доразведки запасы этих месторождений многократно увеличатся.

Результаты экспедиционных исследований объекта C19

Полевые работы в районе объекта C19 проводились 17 августа 2021 г., при этом доставка группы экспедиционных сотрудников ИПНГ РАН была организована ООО «Газпром добыча Надым» на вертолете МИ-8МТВ-1 ООО Авиапредприятие «Газпром авиа» (дочерние предприятия ПАО «Газпром»).

Полевые работы включали осмотр территории с фотофиксацией следов выброшенного при взрыве

мерзлого и талого грунта, аэрофотосъемку района расположения объекта C19 с БПЛА и экологацию дна кратерного водоема. За прошедшее после взрыва МБП время края кратера C19 с образовавшимися при взрыве бруствером выброшенной породы оказались полностью размытыми, при этом в результате оползней грунт сместился на дно кратера, а сам кратер оказался практически полностью затопленным водой, включая его просевшие краевые части с бруствером выброшенной породы (рис. 3). Размеры кратерного водоема составили 26×31 м. Большая часть территории около кратера C19 сильно заросла кустарником высотой до 80 см, осложняющим работу (см. рис. 3).

При осмотре района расположения кратера C19 было обнаружено семь крупных ударных структур с брустверами выдавленного талого грунта, образовавшихся при падении выброшенных при взрыве МБП кусков преимущественно ледогрунта, что подтверждается тем, что они растаяли в основном без остатков (см. рис. 3B и 3C). Пять наиболее крупных ударных структур показаны на рис. 3, при этом диаметр самой крупной составляет около 3,6 м (см. рис. 3B), а размер удаленной в северо-западном направлении на 35 м от центра кратера C19 составляет 1,8×3,1 м (см. рис. 3C). Глубина воды в ударных структурах достигает 20—50 см. Наличие ударных структур свидетельствует о летне-осеннем времени взрыва объекта C19 с талым состоянием активного (сезонно-талого) слоя.

Во время аэрофотосъемки с БПЛА неоднократно терялась связь, при этом один раз потребовалось около полчаса на поиск улетевшего и упавшего

² «Газпром» получил лицензию на Восточно-Бованенковский участок на Ямале // INTERFAX.RU, 26.04.2021. — URL: <https://www.interfax.ru/business/763240>.

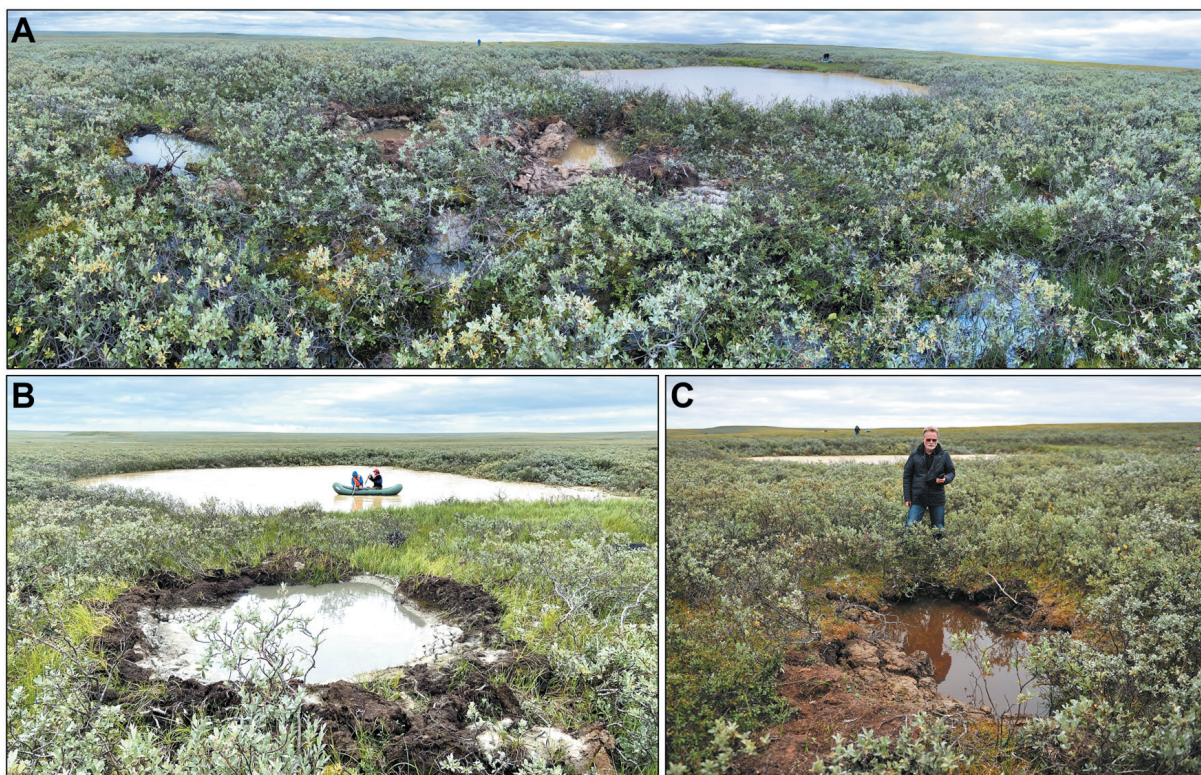


Рис. 3. Наземный панорамный фотоснимок кратера выброса газа С19 17 августа 2021 г. (А) и ударные структуры (В, С) (А, В — В. И. Богоявленский, С — А. М. Мурчич)

Fig. 3. Ground-based panoramic photograph of the C19 gas-blowout crater, August 17, 2021 (A), and impact structures (B, C) (A, B — V. I. Bogoyavlensky, C — A. M. Murchich)

в густую кустарниковую растительность аппарата (был найден А. Б. Осокиным). В итоге работы было сделано 56 аэрофотоснимков при высотах полета БПЛА 50—150 м, четыре из которых приведены на рис. 4 (А1—А4).

Фотограмметрическая обработка 56 аэрофотоснимков с БПЛА была проведена в ПО Agisoft. На рис. 4 приведены построенные ортофотоплан (В) и комплексная ЦМР поверхности земли по данным БПЛА и дна кратерного озера по данным эхолокации (С). Данная ЦМР приведена с изолиниями через 0,5 м, при этом предварительно она была сглажена на базе 0,5×0,5 м. Согласно построенной ЦМР, максимальная глубина озера составляет 3,4 м, а береговая черта проходит по изолинии около 35,5 м (см. рис. 4В — синий пунктир). На рис. 4В синими точками показаны контуры береговой черты восьми ударных структур, включая показанные на рис. 3.

Результаты аэрокосмических исследований объекта С19

Цифровой мониторинг развития объекта С19

Для района объекта С19 в базе данных ArcticDEM [34; 35] доступны 9 полос (стрипов) ЦМР за период 2013—2023 гг., рассчитанных PGC на основе космоснимков WV-1 и WV-2, сделанных в зимнее и летнее время в следующие даты: 10 июня 2013 г., 2 апреля 2014 г., 21 июня 2015 г., 13 июня 2016 г.,

15 апреля 2017 г., 10 июля 2018 г., 5 июля 2019 г., 21 августа 2020 г. и 12 августа 2023 г. В зимнее время рельеф местности значительно искажен наличием снежного покрова неравномерной мощности, в связи с чем зимние ЦМР 2014 и 2017 были исключены из анализа. Пригодными для анализа были признаны 6 ЦМР до взрыва МБП С19 (2013—2020 гг.) и одна ЦМР после его взрыва (2023 г.), приведенные на рис. 5 в виде фрагментов размером 132×140 м в цветовой кодировке альтитуд рельефа с шагом изолиний 20 см. Первые 6 ЦМР построены с разрешением 5 м/пикс., а ЦМР 2023 г. — 2 м/пикс., что отображается ее значительно более высокой детализацией рельефа. Для всех отобранных полос ЦМР была проведена корректирующая увязка с ЦМР ArcticDEM, приведенной на рис. 2В. При этом максимальные вертикальные и горизонтальные поправки составили 12,5 и 6,5 м, что однозначно свидетельствует о необходимости такой процедуры.

В связи с тем, что алгоритмы фотограмметрической обработки не работают для поверхностей воды, над которой часто возникают ошибочные (артефактные) построения, часть ЦМР ArcticDEM 2023 г. внутри контура затопленного кратера была вырезана, и на ее место встроена ЦМР дна кратерного водоема, построенная на основе данных эхолокации 17 августа 2021 г. (см. рис. 4).

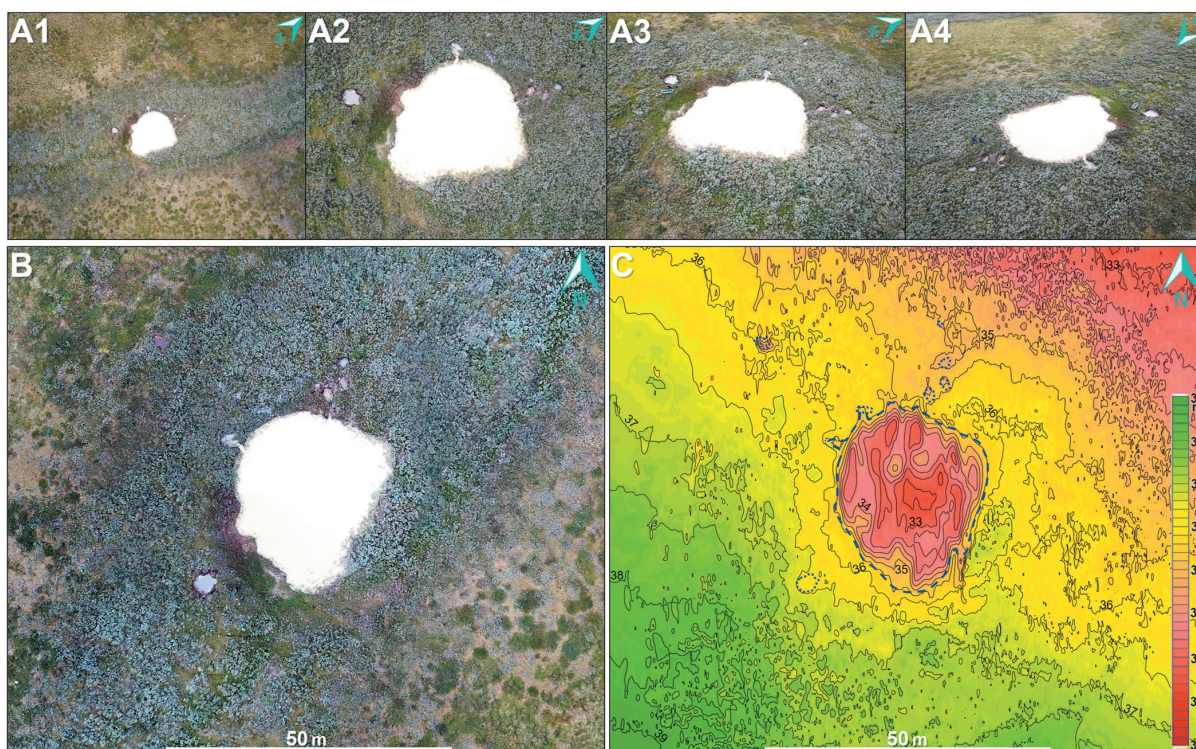


Рис. 4. Затопленный кратер C19: примеры аэрофотоснимков с БПЛА с высот 150 м (A1) и 50 м (A2, A3, A4), ортофотоплан (B) и комплексная ЦМР (C), построенная по данным БПЛА и эхолакации 17 августа 2021 г. (оператор И. В. Богоявленский)
Fig. 4. Flooded crater C19: examples of UAV aerial photographs taken from altitudes of 150 m (A1) and 50 m (A2, A3, A4), an orthophotomosaic (B), and a complex DEM (C) generated from UAV and echosounding data on August 17, 2021 (operator I. V. Bogoyavlensky)

На основе анализа серии ЦМР ArcticDEM за 2013—2020 гг. (см. рис. 5) можно отметить следующие особенности развития МБП C19. Объект исследований расположен на склоне 3-й морской террасы субмеридионального простирания, при этом падение склона направлено на северо-восток. В 2013 г. он представлял собой структурный нос размером около

35×35 м со слабо выраженным сводовым поднятием высотой около 60 см. За семилетний период это поднятие увеличилось примерно на 100 см.

В связи с расположением МБП C19 на склоне морской террасы приведенные на рис. 5 изображения, кажущиеся размеры и характеристики роста МБП в 2013—2020 гг. несколько искажены. Более де-

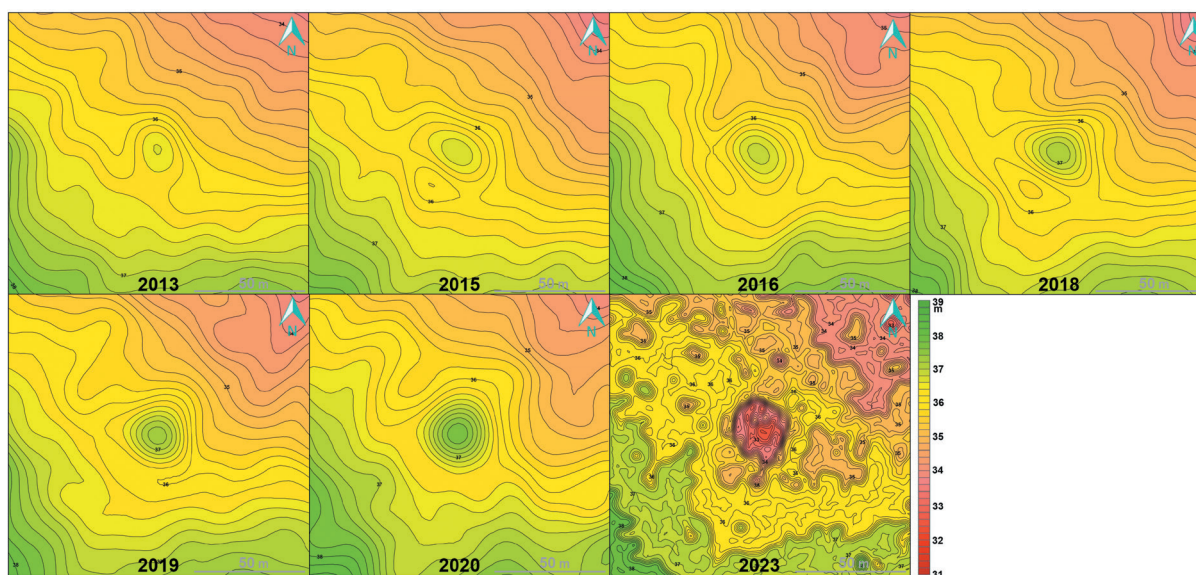


Рис. 5. ЦМР ArcticDEM объекта C19 за период 2011—2023 гг.
Fig. 5. Digital elevation model ArcticDEM of the C19 object for the period 2011–2023

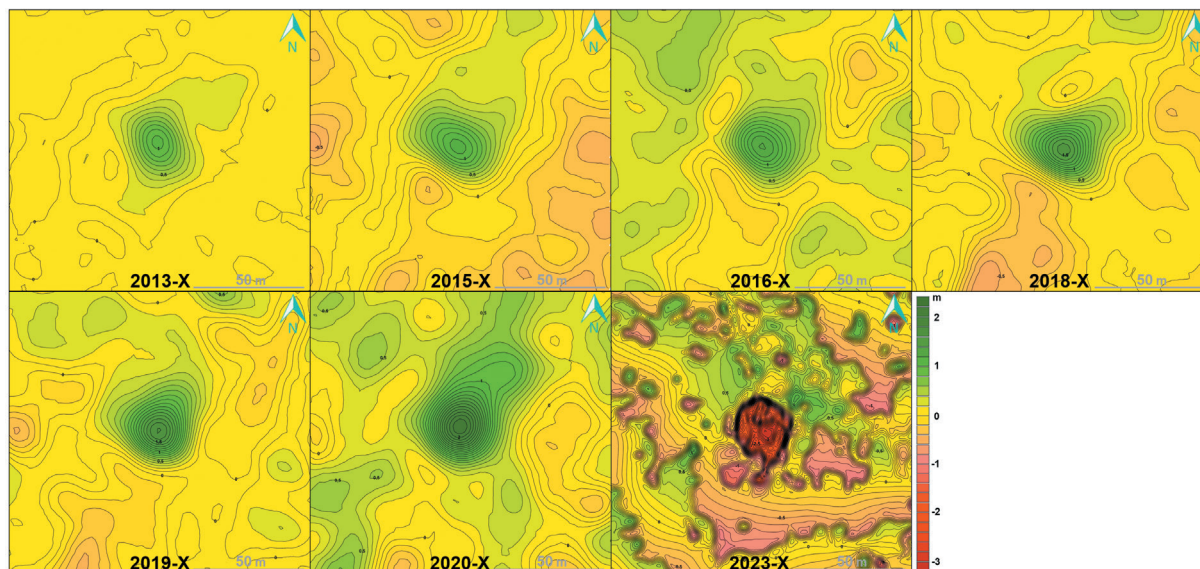


Рис. 6. Разностные ЦМР объекта С19 на основе ArcticDEM за период 2011–2023 гг.
Fig. 6. Difference DEMs of object C19 based on ArcticDEM for the period 2011–2023

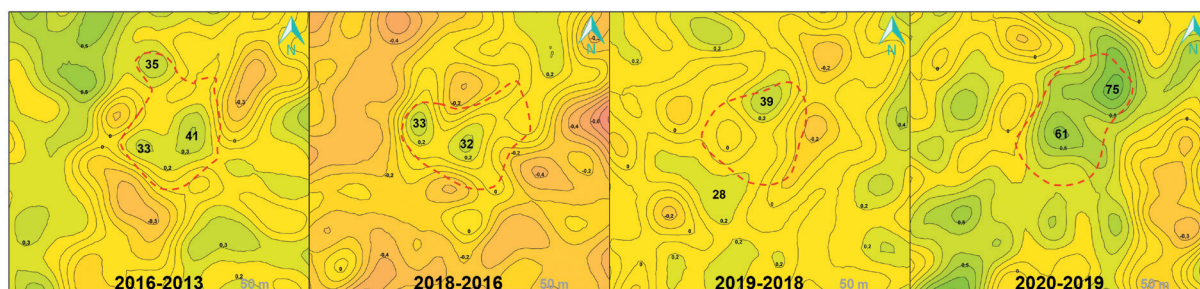


Рис. 7. Детализированный анализ скорости роста МБП С19 на основе ЦМР ArcticDEM за период 2013–2020 гг.
Fig. 7. Detailed analysis of the growth rate of the C19 perennial heaving mound based on ArcticDEM digital elevation models for the period 2013–2020

тальный и точный анализ изменений размеров МБП возможен при устранении влияния моноклиальной составляющей ЦМР, что требует ее коррекции на условное время «Х» до появления структурного носа аналогично выполненным ранее для объектов С1, С2, С11, С15, С17, С22 и С23 [11–16]. Итоговая ЦМР создана на основе коррекции исходной ЦМР за 2013 г. путем генерализации (интерполяции) изолиний со «срезанием» структурного носа (см. рис. 5). На следующем этапе скорректированная ЦМР «Х» вычиталась из каждой разновременной ЦМР, при этом были получены разностные разновременные массивы ЦМР (4D-модели), представленные на рис. 6 с интервалом цветовой кодировки аномальных изменений района объекта С19 через 0,1 м (легенда приведена через 0,2 м) и проведенными изолиниями через 0,1 м. Согласно рис. 6 размеры МБП увеличились с 33×45 м в 2013 г. до 40×65 м в 2020 г.

Детализированный мониторинг изменений МБП С19 проведен на основе разностных массивов данных между сравниваемыми годами, представленными на рис. 7 с текущими положениями контуров

бугра (красный пунктир). При этом цветовая кодировка дана через 0,2 м, а изолинии проведены через 0,1 м. Согласно рис. 7 рост различных участков бугра происходил с разными скоростями (подписаны в сантиметрах). За трехлетний период с 2013 до 2016 г. максимальные приросты высоты МБП достигли 33–41 см, при этом среднегодовая скорость роста составила 11–13,7 см/год. За двухлетний период с 2016 по 2018 гг. изменения МБП составили 10–33 см (5–16,5 см/год). Годовые приросты МБП с 2018 по 2019 гг. составили 10–39 см/год. За год до взрыва в 2020 г. (точнее, за 13,5 мес.) наблюдается экстремально высокий рост бугра — центральная и северо-восточная части МБП выросли на рекордные значения — 61 и 75 см. С учетом коррекции за 13,5 мес. среднегодовой прирост составляет около 54 и 67 см/год.

Определение временного диапазона взрыва бугра пучения

В результате детального анализа доступных космических снимков со спутника Sentinel-2

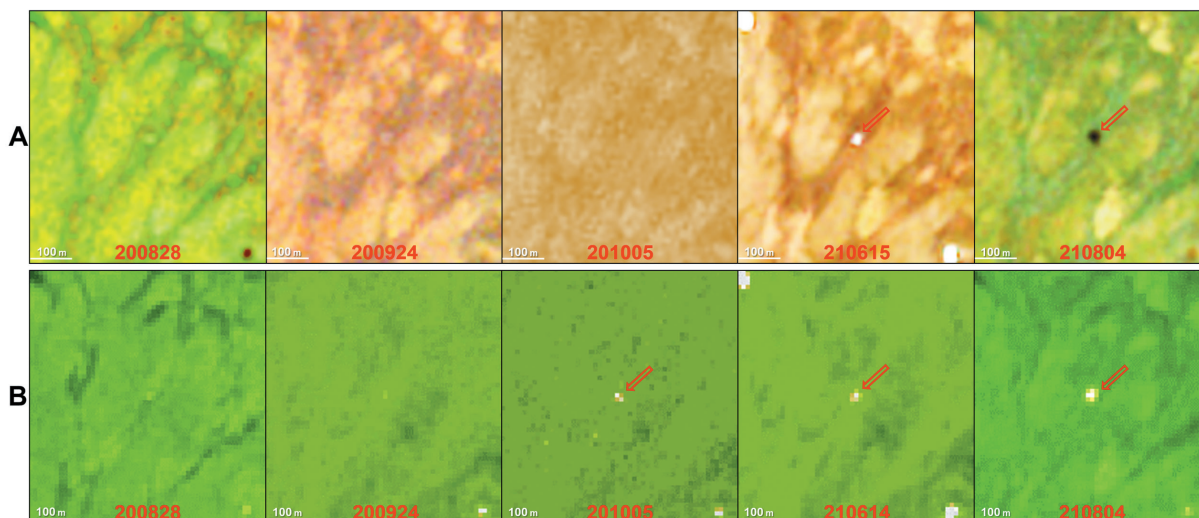


Рис. 8. Мониторинг состояния объекта C19 в 2020–2021 гг. по космоснимкам спутника Sentinel-2 (A) и индексу NDVI (B) (шестизначные цифры — год, месяц, число)
Fig. 8. Monitoring of the C19 object state in 2020–2021 using Sentinel-2 satellite images (A) and the NDVI index (B) (six-digit numbers: year, month, day)

в период с 20 августа 2019 г. по 24 сентября 2020 г. (рис. 8A) на объекте C19 (центр космоснимков) установлено существование МБП, размеры которого постепенно увеличивались, при этом на месте МБП по нормализованному дифференцированному вегетационному индексу NDVI наблюдается слабо различимое светлое пятно (см. рис. 8B). На космоснимке 5 октября 2020 г. из-за низкого качества практически ничего не видно, однако по индексу NDVI появилось четкое светлое пятно, показанное стрелкой, свидетельствующее о значительном изменении характера поверхности земли (нарушении растительного покрова). Аналогичные белые пятна по индексу NDVI наблюдаются начиная с 2021 г. на результатах всех последующих космосъемок, включая 16 июня 2026 г. При этом также начиная с 2021 г. на всех доступных космоснимках на месте МБП наблюдаются белые пятна из-за наличия снега и/или льда в кратере (например, см. рис. 8A — 15 июня 2021 г.) или практически черные пятна за счет поглощения света водой (например, см. рис. 8A — 4 августа 2021 г.). Таким образом, можно считать обоснованным временной диапазон выброса газа с 24 сентября по 5 октября 2020 г., что согласуется с образованием ударных кратеров в период сезонно-талого состояния грунта.

Обсуждение результатов

На основе анализа характера обнажившегося кратера C19 (см. рис. 1) в сравнении с другими детально исследованными объектами выбросов газа на ранних этапах образования кратеров (до затопления), включая C1, C3, C4, C17, C22 и C23 [7–17], можно утверждать, что газонасыщенная полость объекта C19 образовалась в массиве подземного льда. Это подтверждается и образованием боль-

шинства ударных кратеров, при которых упавшие куски льда полностью (бесследно) растаяли, как и на объекте самого мощного взрыва C2, произошедшего в период с 24 сентября по 15 октября 2012 г. [23], что практически совпадает с C19 (с 24 сентября по 5 октября 2020 г.). Обнажившаяся при взрыве бугра газодинамического пучения полость объекта C19 была полностью затоплена за три летних месяца 2021 г., как и на объекте C2 летом 2013 г. Это, видимо, связано с притоком не только метеорных вод и таянием подземного льда, но и с выходом подземных вод со дна кратера [8; 9; 23].

В результате детализированного анализа скорости роста МБП C19 на основе ЦМР ArcticDEM за 2013–2020 гг. (см. рис. 7) установлено, что максимальные значения его приростов не всегда приурочены к сводовой части, как это предполагалось ранее. За два последних года они были зафиксированы в его северной периферийной части. На первом этапе мониторинга 2013–2016 гг. максимальная среднегодовая скорость не превышала 13,7 см/год (см. рис. 7), в 2016–2018 гг. она выросла до 16,5 см/год, а в 2018–2019 гг. увеличилась до 39 см/год. В последний год существования МБП C19 (2019–2020 гг.) в его центральной и северной частях произошел экстремально быстрый рост со среднегодовыми скоростями около 54 и 67 см/год, что в 4,0–4,9 раза выше, чем в 2013–2016 гг. Подобные результаты были ранее получены для бугров газодинамического пучения объектов C22 и C23, на которых средняя скорость роста, рассчитанная за три года перед взрывом, составляла 44 и 43 см/год [15; 16]. С учетом данных по C19 можно с высокой вероятностью предположить, что на этих буграх была подобная ситуация, при этом в последний год они росли также с экстремальными

ми скоростями порядка 50—70 см/год, что требует дальнейших подтверждений. Очевидно, что ежегодный мониторинг дает лучшие представления об особенностях и скоростях роста бугров газодинамического пучения, способствующие повышению надежности прогноза грядущих взрывов.

Как мы отмечали ранее касательно объектов С22 и С23 [15; 16], высокая скорость роста бугров пучения около 40—67 см/год совершенно не характерна для закрытых систем МБП криогенного типа (булгуньяхи/пинго), на которых на основе данных J. R. Маскау она обычно изменяется от 1 до 15 см/год [40; 41]. Таким образом, подтверждается ранее сделанный вывод [15; 16], что аномально высокая средняя скорость роста МБП около 40 см/год (и выше) является закономерностью и может служить основным критерием выявления взрывоопасных бугров газодинамического пучения.

В 330 м юго-восточнее кратерного озера С19 по данным ДЗЗ в идентичных геоморфологических условиях (склон 3-й морской террасы с альтитудой около 36 м) обнаружено подобное небольшое озеро Х1 (26×32 м, 70,7205° N, 69,2393° E) со следами оползневых явлений (термоцирковый морфогенез) на его западном побережье (см. рис. 2). В 10 м юго-восточнее озера Х1 имеется маленький водоем диаметром около 4 м, возможно, являющийся ударной структурой, подобной обнаруженной около кратера С19 структуре диаметром около 3 м (см. рис. 2). Кроме того, еще один подобный объект Х2 размером 50×77 м обнаружен юго-восточнее С19 на расстоянии 1,28 км (70,7154° N, 69,2594° E). Он также со следами оползневых явлений, и около него имеется маленький водоем размером 8×12 м, возможно, являющийся ударной структурой. Таким образом, весьма вероятно, что ранее в районе объекта С19 уже происходили два выброса/взрыва газа, подобных произошедшему на объекте С19.

В районе объекта С19 в тающем льду ряда термокарстовых озер обнаружены многочисленные неоднородности, видимо, связанные с неравномерным таянием льда из-за включений пузырей газа. Ближайшее такое озеро (размеры 560×750 м, координаты центра — 70,7207° N, 69,1811° E) расположено в 1,7 км западнее С19 также в пределах Восточно-Бованенковского НГКМ. С учетом изложенного можно утверждать о региональной газоносности ВЧР в районе объекта С19.

Ближайшая к кратеру С19 скважина № 1 (70,7325° N, 69,2236° E, см. рис. 2) расположена северо-западнее на расстоянии 1,1 км, а скважина № 4 (70,68917° N, 69,2308° E) находится южнее на 3,8 км. Однако по данным ДЗЗ на месте этих и других скважин никаких следов аварийных ситуаций не обнаружено, что позволяет предполагать маловероятным наличие техногенного фактора в выбросе газа на объекте С19.

Заключение

В результате мониторинга развития МБП С19 на основе ЦМР ArcticDEM за период 2013—2020 гг. установлено, что максимальные значения его приростов не всегда приурочены к сводовой части. В предшествующий взрыву МБП год (2019—2020 гг.) зафиксирован экстремально быстрый рост его центральной и северной частей со среднегодовыми скоростями около 54 и 67 см/год, что в 4,0—4,9 раза выше, чем на начальном этапе мониторинга (2013—2016 гг.).

На основе анализа данных ДЗЗ с космического аппарата Sentinel-2 установлен временной диапазон взрыва МБП С19 с 24 сентября по 5 октября 2020 г. Обнажившаяся при взрыве бугра газодинамического пучения полость объекта С19 была полностью затоплена за три летних месяца 2021 г. Для повышения надежности определения временного диапазона взрыва МБП рекомендуется анализ космоснимков проводить в комплексе с нормализованным дифференцированным вегетационным индексом NDVI.

В методическом плане для повышения надежности прогноза грядущих взрывов ежегодный мониторинг развития потенциальных бугров газодинамического пучения рекомендуется проводить в летние периоды наиболее идентичного фенологического состояния растительности.

Представляется необходимым учитывать выявленные районы выбросов газа с формированием кратеров на суше и дне водоемов Арктики не только для повышения безопасности освоения ресурсов углеводородов и других полезных ископаемых, но и при комплексных исследованиях перспектив нефтегазоносности всего осадочного чехла и, возможно, фундамента.

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 признательны руководству ООО «Газпром добыча Надым», оказавшему большую поддержку экспедиционным исследованиям ИПНГ РАН на основе соглашения о научно-техническом сотрудничестве.

Литература/References

1. Oblogov G. E., Vasiliev A. A., Streletskiy D. A. et al. Localized vegetation, soil moisture, and ice content offset permafrost degradation under climate warming. *Geosciences*, 2023, vol. 13, no. 5, art. 129. DOI: 10.3390/geosciences13050129.

2. Turetsky M. R., Abbott M. R., Jones M. C. et al. Carbon release through abrupt permafrost thaw. *Nature Geoscience*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 138—143. DOI: 10.1038/s41561-019-0526-0.
3. Torn M. S., Abramoff R. Z., Vaughn L. J. S., Chafe O. E. H. et al. Large emissions of CO₂ and CH₄ due to active-layer warming in Arctic tundra. *Nature Communications*, 2025, vol. 16, art. 46, 12 p. DOI: 10.1038/s41467-024-54990-9.
4. Chuvilin E. M., Yakushev V. S., Perlova E. V. Gas and possible gas hydrates in the permafrost of Bovanenkovo gas field, Yamal Peninsula, West Siberia. *Polarforschung*, 2000, vol. 68, no. 1—3, pp. 215—219.
5. Chuvilin E., Grebenkin S., Zhmaev M. Gas permeability of sandy sediments: effects of phase changes in pore ice and gas hydrates. *Energy and Fuels*, 2021, vol. 35, no. 9, pp. 7874—7882. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c00366.
6. Аржанов М. М., Малахова В. В. Моделирование условий накопления и перехода в реликтовое состояние метангидратов криолитозоны севера Западной Сибири // *Физика Земли*. — 2023. — № 2. — С. 149—161.
7. Arzhanov M. M., Malakhova V. V. Modeling the conditions for the accumulation and transition to a relict state of methane hydrates in the cryolithozone of northern Western Siberia. *Physics of the Solid Earth*, 2023, no. 2, pp. 149—161. DOI: 10.31857/S0002333723020047. (In Russian).
8. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // *Бурение и нефть*. — 2014. — № 9. — С. 13—18.
9. Bogoyavlensky V. I. The threat of catastrophic gas blowouts from the Arctic cryolithozone. *Yamal and Taymyr craters*. *Oil and Drilling*, 2014, no. 9, pp. 13—18. (In Russian).
10. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // *Гор. пром-сть*. — 2020. — № 1. — С. 97—118.
11. Bogoyavlensky V. I. Natural and technogenic threats in fossil fuels production in the Earth cryolithosphere. *Russian Mining Industry*, 2020, no. 1 (149), pp. 97—118. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118. (In Russian).
12. Богоявленский В. И. Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // *Арктика: экология и экономика*. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 51—66.
13. 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).
14. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Результаты аэрокосмических и экспедиционных исследований крупных выбросов газа на Ямале в районе Бованенковского месторождения // *Арктика: экология и экономика*. — 2017. — № 3 (27). — С. 4—17.
15. Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Results of aerial, space and field investigations of large gas blowouts near Bovanenkovo field on Yamal peninsula. *The Arctic: Ecology and Economy*, 2017, no. 3 (27), pp. 4—17. (In Russian).
16. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н., Никонов Р. А. Цифровые технологии дистанционного выявления и мониторинга развития бугров пучения и кратеров катастрофических выбросов газа в Арктике // *Арктика: экология и экономика*. — 2020. — № 4 (40). — С. 90—105.
17. Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N., Nikonov R. A. Digital technologies for remote detection and monitoring of the development of heaving mounds and craters of catastrophic gas blowouts in the Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 4 (40), pp. 90—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-90-105. (In Russian).
18. 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.
19. 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).
20. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al. Seyakha catastrophic blowout and explosion of gas from the permafrost in the Arctic, Yamal Peninsula. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, vol. 196, p. 103507. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103507>.
21. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А., Каргина Т. Н. Мониторинг развития Мордьякского объекта взрыва газа на Ямале на основе данных дистанционного зондирования Земли // *Арктика: экология и экономика*. — 2022. — Т. 12, № 4. — С. 513—523.
22. Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kargina T. N. Monitoring of the Mordyyakha gas explosion object development on Yamal on the basis of Earth remote sensing data. *Arctic: Ecology and Economy*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 513—523. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-4-513-523. (In Russian).
23. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Мониторинг развития Дуплетного объекта взрыва газа C22 на полуострове Ямал по данным дистанционного зондирования Земли // *Арктика: экология и экономика*. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 320—333.
24. 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).
16. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А., Гаврилов А. А. Аномально быстрый рост и взрыв Ямальского бугра газодинамического пучения С23 в 2020—2024 годах // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 3. — С. 4—17.
- Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Gavrilov A. A. Anomalous rapid growth and explosion of the C23 Yamal gas-dynamic heaving mound in 2020—2024. Arctic: Ecology and Economy, 2025, vol. 15, no. 3, pp. 4—17. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-4-17. (In Russian).
17. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Кушанков А. В. Геофизические методы обеспечения технологического суверенитета и национальной безопасности России в Арктике // Вестник РАН. — 2024. — Т. 94, № 10. — С. 896—914.
- 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/S0869587324100055.
18. Эпов М. И., Ельцов И. Н., Потапов В. В. и др. Бермудский треугольник Ямала // Наука из первых рук. — 2014. — Т. 59, № 5. — С. 14—23.
- Erov M. I., Eltsov I. N., Potapov V. V. et al. Bermuda Triangle of Yamal. First-hand Science, 2014, vol. 59, no. 5, pp. 14—23. (In Russian).
19. Оленченко В. В., Синицкий А. И., Антонов Е. Ю. и др. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования «Ямальский кратер» // Криосфера Земли. — 2015. — Т. 19, № 4. — С. 94—106.
- Olenchenko V. V., Sinitsky A. I., Antonov E. Yu. et al. Results of geophysical researches of the area of new geological formation “Yamal Crater”. Earth's Cryosphere, 2015, vol. 19, no. 4, pp. 94—106. (In Russian).
20. 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 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).
21. Leibman M. O., Kizyakov A. I., Plekhanov A. V., Streletskaya I. D. New permafrost feature — deep crater in Central Yamal, West Siberia, Russia, as a response to local climate fluctuations. Geography, Environment, Sustainability, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 68—79. Available at: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2014-7-4-68-79>.
22. Kizyakov A., Leibman M., Zimin M. et al. Gas emission craters and mound-predecessors in the North of West Siberia, similarities and differences. Remote Sensing, 2020, 12, 2182. DOI: 10.3390/rs12142182.
23. Chuvilin E. M., Sokolova N. S., Bukhanov B. A. et al. Formation of Gas-Emission Craters in Northern West Siberia: Shallow Controls. Geosciences, 2021, 11, 393. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences11090393>.
24. Zolkos S., Fiske G., Windholz T. et al. Detecting and Mapping Gas Emission Craters on the Yamal and Gydan Peninsulas, Western Siberia. Geosciences, 2021, 11, 21. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences11010021>.
25. Schurmeier L. R., Brouwer G. E., Fagents S. A. Formation of the Siberian Yamal gas emission crater via accumulation and explosive release of gas within permafrost. Permafrost and Periglacial Process, 2023, vol. 35, pp. 33—45. DOI: 10.1002/ppp.2211.
26. Hellevang H., Ippach M. R., Westermann S., Nooraiepour M. Formation of giant Siberian gas emission craters (GECs). Science of The Total Environment, 2025, vol. 995, 180042. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180042>.
27. 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 content of Yamal. Moscow, LLC “Nedra-Business Center”, 2003, 352 p. (In Russian).
28. Брехунцов А. М., Монастырев Б. В., Нестеров И. И., Скоробогатов В. А. Нефтегазовая геология Западно-Сибирской Арктики. — Тюмень: ООО «МНП «Геодата», 2020. — 464 с.
- Brekhuntsov A. M., Monastirev B. V., Nesterov I. I., Skorobogatov V. A. Oil and gas geology of the West Siberian Arctic. Tyumen, OOO MNP Geodata, 2020, 464 p. (In Russian).
29. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИГАЗ, 2009. — 192 с.
- Yakushev V. S. Natural Gas and Gas Hydrates in Cryolithozone. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (In Russian).
30. Баду Ю. Б., Трофимов В. Т., Васильчук Ю. К. Основные закономерности распространения и типы пластовых залежей подземного льда в северной части Западно-Сибирской плиты // Пластовые льды криолитозоны. — Якутск: ИМ СО АН СССР, 1982. — С. 13—24.
- Badu Yu. B., Trofimov V. T., Vasilchuk Yu. K. Basic patterns of distribution and types of stratal deposits of underground ice in the northern part of the West Siberian Plate. Formative ice of the permafrost zone. Yakutsk, IM SO AN USSR, 1982, pp. 13—24. (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. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: Монография в трех томах. — Т. 2: Криосфера Бованенковского нефтега-

зоконденсатного месторождения / Под общ. ред. Ю. Б. Бадю, Н. А. Гафарова, Е. Е. Подборного. — М.: ООО «Газпром Экспо», 2013. — 421 с.

Cryosphere of oil and gas condensate fields of the Yamal Peninsula: Monograph in 3 volumes. Vol. 2. Cryosphere of the Bovanenkovo oil and condensate field. Under the general direction. Eds. Yu. B. Badu, N. A. Gafarov, E. E. Podborny. Moscow, Gazprom Expo LLC, 2013, 421 p. (In Russian).

33. 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.

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).

34. Porter C., Howat I., Noh M.-J. et al. ArcticDEM — Strips, Version 4.1. 2022, Harvard Dataverse, V1. Available at: <https://doi.org/10.7910/DVN/C98DVS>.

35. Porter C., Howat I., Noh M.-J. et al. ArcticDEM — Mosaics, Version 4.1. 2023, Harvard Dataverse, V1. Available at: <https://doi.org/10.7910/DVN/3VDC4W>.

36. Quadcopter DJI Mavic Pro Platinum. Available at: <https://www.geo-spektr.ru/bespilotnye-letatelnye-apparaty/kvadrokoptery/dji/DJI-Mavic-Pro-Platinum.html>.

37. Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 2.0. Agisoft LLC, 2023, 253 p. Available at: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_ru.pdf.

38. PIX4Dmapper. The leading photogrammetry software for professional drone mapping. Available at: <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software/>.

39. ArcGIS. Геопространственная платформа ESRI корпоративного уровня. — URL: <https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/geospatial-platform/overview>.

ArcGIS. ESRI's enterprise-grade geospatial platform. Available at: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/geospatial-platform/overview>.

40. Mackay J. R. Growth of Ibyuk Pingo, Western Arctic Coast, Canada, and some implications for environmental reconstructions. Quaternary Research, 1986, vol. 26, iss. 1, pp. 68—80.

41. Mackay J. R. Pingo Growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula Area, Western Arctic Coast, Canada: a long-term field study. Géographie physique et Quaternaire, 1998, vol. 52, no. 3, pp. 1—53.

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, старший 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.

Полозов Владимир Николаевич, кандидат технических наук, главный инженер, первый заместитель генерального директора ООО «Газпром добыча Надым» (629736, Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, Надым, Пионерская ул., стр. 14), e-mail: Polozov.VN@nadyam-dobycha.gazprom.ru.

Осокин Алексей Борисович, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель начальника Инженерно-технического центра ООО «Газпром добыча Надым» (629736, Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, Надым, Пионерская ул., стр. 14), e-mail: Osokin.AB@nadyam-dobycha.gazprom.ru.

EXTREME GROWTH AND EXPLOSION OF THE C19 GAS-DYNAMIC HEAVING MOUND ON THE YAMAL PENINSULA IN 2020

Bogoyavlensky, V. I.¹, Bogoyavlensky, I. V.¹, Nikonov, R. A.¹, Polozov, V. N.², Osokin, A. B.²

¹ Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

² Gazprom Dobycha Nadym LLC (Nadym, Russian Federation)

For citing

Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Polozov V. N., Osokin A. B. Extreme growth and explosion of the C19 gas-dynamic heaving mound on the Yamal Peninsula in 2020. *Arctic: Ecology and Economy*, 2026, vol. 16, no. 3, pp. 361—373. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-3-361-373. (In Russian).

The article was received on May 25, 2025

Abstract

Based on an analysis of satellite imagery combined with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), it was determined that the explosion of perennial gas-dynamic heaving mound C19 on the Yamal Peninsula occurred in period between September 24 and October 5, 2020. Its development monitoring using the Arctic-DEM digital elevation model revealed that in the year preceding the explosion and formation of the crater C19 (2019—2020), extreme growth of the central and northern parts of the mound occurred with average annual rates of approximately 54 and 67 cm/year, which is 4.0-4.9 times higher than at the initial stage of monitoring in 2013—2016. In methodological terms, to improve the reliability of forecasting future explosions of potential gas-dynamic heaving mounds, it is recommended to conduct annual monitoring of their development during summer periods characterized by the most consistent phenological state of the vegetation.

Keywords: Arctic, Yamal Peninsula, East-Bovanenkovo Field, permafrost, perennial heaving mounds (PHM), gas blowouts, craters, remote sensing (RS), digital elevation model (DEM), ArcticDEM.

Funding

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

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the management of Gazprom Dobycha Nadym LLC, for providing support to the field research of the OGRI RAS based on the Agreement on Scientific and Technical Cooperation.

Information about the authors

Bogoyavlensky, Vasily Igorevich, Doctor of Engineering Science, Corresponding member of RAS, Deputy Director for Research, Head of “Shelf” Laboratory, Chief Researcher, Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Sciences (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: geo.ecology17@gmail.com.

Bogoyavlensky, Igor Vasilievich, Senior Researcher, Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Sciences (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: ivb@ipng.ru.

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

Polozov Vladimir Nikolayevich, PhD of Engineering Science, Chief Engineer and First Deputy General Director of Gazprom Dobycha Nadym LLC (14, Pionerskaya St., Nadym, Yamalo-Nenets Autonomous Area, Russia, 629736), e-mail: Polozov.VN@nadym-dobycha.gazprom.ru.

Osokin Alexey Borisovich, PhD of Geological and Mineralogical Science, Deputy Head of the Engineering and Technical Center, Gazprom Dobycha Nadym LLC (14, Pionerskaya St., Nadym, Yamalo-Nenets Autonomous Area, Russia, 629736), e-mail: Osokin.AB@nadym-dobycha.gazprom.ru.