

НАУЧНЫЙ И ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ТОМ 14, №3, 2024

АРКТИКА

ЭКОЛОГИЯ И ЭКОНОМИКА

ISSN 2223-4594



© В.И. Богоявленский. Катастрофические изменения тундры Ямала через три года после взрыва многолетнего бугра пучения и образования кратера С2 в 2012 г. Снимок из вертолета 8 июля 2015 г.

Федеральное
государственное бюджетное
учреждение науки
Институт проблем
безопасного развития
атомной энергетики
Российской академии наук

- ▶ Научные исследования в Арктике
- ▶ Изучение и освоение природных ресурсов Арктики
- ▶ Экономика и управление народным хозяйством Арктической зоны
- ▶ Экология
- ▶ Кораблестроение для Арктики
- ▶ Качество и уровень жизни коренных малочисленных народов Севера

DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-320-333
УДК 502.171, 504.4, 504.7, 553.981.2

МОНИТОРИНГ РАЗВИТИЯ ДУПЛЕТНОГО ОБЪЕКТА ВЗРЫВА ГАЗА С22 НА ПОЛУОСТРОВЕ ЯМАЛ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

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

Статья поступила в редакцию 11 июля 2024 г.

Для цитирования

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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-320-333.

Выполнено комплексное исследование Дуплетного объекта С22 катастрофического взрыва газа в 2023 г. в центральной части полуострова Ямал в 12,7 км южнее Бованенковского месторождения на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Уникальность объекта С22 заключается в его расположении в 230 м от подобного широко известного объекта С2, взорвавшегося в 2012 г., в связи с чем объект С22 получил название Дуплетный. На основе данных ДЗЗ установлено, что в период с 26 августа по 3 сентября 2023 г. произошел взрыв многолетнего бугра пучения (МБП) С22. По данным ArcticDEM за период 2011–2023 гг. определены особенности изменений размеров МБП С22, включая аномально высокую среднюю скорость роста 44 см/год за три года до его взрыва, которая может служить одним из критериев выявления взрывоопасных объектов. По данным аэрофотосъемки с БПЛА 14 мая 2024 г. в результате фотограмметрической обработки построена 3D-модель, на которой отображена частично занесенная снегом полость в массиве подземного льда. Глубина полости от брусстера кратера — не менее 28,5 м, диаметр горловины кратера — около 13 м. В нижней части полость значительно расширяется. Установлено, что дно полости имеет эллиптическую форму размером как минимум 26×33 м с ориентацией большей оси по направлению разломов Бованенковского месторождения.

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

Введение

В июне 2014 г. мировое научное сообщество было потрясено видеосъемкой гигантского кратера, обнаруженного пилотами вертолета в центральной части полуострова Ямал [1—5]. Особое внимание он привлек своим образованием всего в 30 км южнее уникального по запасам газа (4,9 трлн м³) Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения

(НГКМ), добыча газа на котором началась в 2012 г., и в 3,5 км восточнее магистрального газопровода высокого давления «Бованенково — Ухта». Авторы данной статьи незамедлительно приступили к исследованию ранее неизвестного явления, при этом обнаруженный кратер получил индекс С1 в геотектонической системе «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО»), созданной и постоянно развиваемой в Институте проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН [1; 2]. Вскоре появилась информация о втором кратере (С2), расположенном в 12,7 км южнее Бованенков-

ского НГКМ, а также о двух кратерах, обнаруженных на полуострове Гыданский, — Антипаютинском (С3) и Дерябинском (С4) [1].

В первой нашей работе по теме изучения арктических кратеров [1] была сформулирована модель образования нового феномена в виде «...мощного выброса (пневматического выхлопа) газа из неглубокой подземной залежи, хотя возможно, что было и воспламенение (взрыв) газа, не оставившее следов на мерзлой породе с большим содержанием льда, т. е. сработал газозрывной механизм (взрывоопасной является 5—16% концентрация метана в воздухе). Наиболее вероятно, что залежь газа образовалась не в традиционном песчаном коллекторе, а в полости на месте постепенного вытаивания погребенного льда (пластового, жильного, ядра булгунняха-гидроакколита-*pingo* и др.) с замещением ледового/водного пространства газом. <...> Существование ММП привело к... накоплению огромных объемов газа в ВЧР, в том числе и в термокарстовых полостях. Давления накопившегося газа в ряде мест оказалось достаточно для разрушения покрывающей толщи ММП, при этом произошел выброс разрушенной части породы за счет действия пневматического или газозрывного механизмов с образованием брустверов» [1, с. 14, 17]. В ходе дальнейших 10-летних исследований (11 сезонов) было проведено 16 экспедиций и выполнен огромный объем камеральных исследований, включая модельные, в ходе которых мы получили подтверждения правильности первоначальной гипотезы, опубликованные во многих десятках статей и монографий [6—20], в том числе в обобщающих работах 2020—2021 гг. [13; 14].

За прошедшее десятилетие на севере Западной Сибири было обнаружено и в разной степени исследовано более 20 кратеров, большинство которых оказалось приурочено к аномальной зоне повышенного теплового потока, обнаруженной в западной части Ямала около южного контура Бованенковского НГКМ [2; 9; 14].

Во всех четырех случаях выбросов газа из разорвавшихся многолетних бугров пучения (МБП) С3, С9, С11 и С21, наблюдавшихся коренным населением, подтверждаются самовоспламенения и взрывы газа, что делает данное явление крайне опасным.

Параллельно с изучением взорвавшихся объектов на полуострове Ямал по данным дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ) было выявлено более 7,3 тыс. потенциально опасных МБП [12; 15; 16]. Кроме того, по данным ДЗЗ и экспедиций на суше проводились исследования объектов дегазации Земли с мелководного дна арктических водоемов [2; 6; 7; 11; 20]. При этом впервые на Ямале на дне 3551 термокарстового озера и 16 рек были «...обнаружены 4992 зоны мощных выбросов (взрывов) газа в виде кратеров (покмарок). Кроме того, в прибрежных зонах Карского моря выявлено еще 669 зон взрывной дегазации, преимущественно

в губах, заливах, лиманах и бухтах. С учетом полуострова Югорский и острова Белый всего в регионе исследований найдено 6022 зоны взрывной дегазации» [20].

22 февраля 2024 г. пилот вертолета Югорского филиала ООО Авиапредприятие «Газпром Авиа» Э. А. Пушников обнаружил в 12,7 км южнее Бованенковского НГКМ новый кратер, о чем информировал руководство ООО «Газпром добыча Надым» и предоставил видеоматериалы. В ГИС «АМО» данный кратер был зарегистрирован под индексом С22 (координаты 70,14614° N, 68,50017° E).

Анализ информации в ГИС «АМО» позволил установить, что кратер С22 находится в 230 м к северо-востоку от центра подобного широко известного кратера взрыва газа С2 (70,14449° N, 68,49643° E), показанного на рис. 1. В связи с их необычайно близким расположением кратер С22 получил название Дуплетный. Объект С2 был достаточно детально исследован по данным ДЗЗ и во время экспедиций в 2015—2017 гг., при этом результаты опубликованы в [9; 28]. По данным ДЗЗ было установлено, что кратер С2 образовался в период с 24 сентября по 15 октября 2012 г. [9; 28]. Уже летом 2013 г. кратер С2 превратился в термокарстовое озеро сложной формы, размеры которого в 2023 г. достигли 110×145 м (см. рис. 1В). Аэрофотоснимок района объектов С2 и С22 2015 г. приведен на обложке журнала.

Основными целями данной работы являются комплексное изучение причин и последствий катастрофического выброса газа на объекте С22, построение его трехмерных моделей до и после взрыва на основе данных ДЗЗ из космоса и с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также определение временного интервала взрыва, приведшего к образованию кратера.

Комплексные полевые исследования объекта выброса газа С22 состоялись 14 мая 2024 г. благодаря логистической поддержке ООО «Газпром добыча Надым». На рис. 2 приведены фотографии объекта исследований, сделанные из вертолета (А, В) и с бруствера кратера (С). Район работ, верхняя часть кратера, дно и южные стенки обнажившейся гигантской полости оказались сильно занесенными снегом, что осложняло исследования. Северо-западная часть стенок полости не была занесена снегом, что позволило увидеть, что полость образовалась в массиве подземного льда (см. рис. 2С).

Краткое геолого-географическое и геокриологическое описание района работ

Полуостров Ямал относится к северной части Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. По данным Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых, по состоянию на 2021 г. на суше и вблизи побережья полуострова открыто 27 месторождений углеводородов с начальными запасами газа по категориям ABC₁+C₂ свыше 18 трлн м³. Ос-

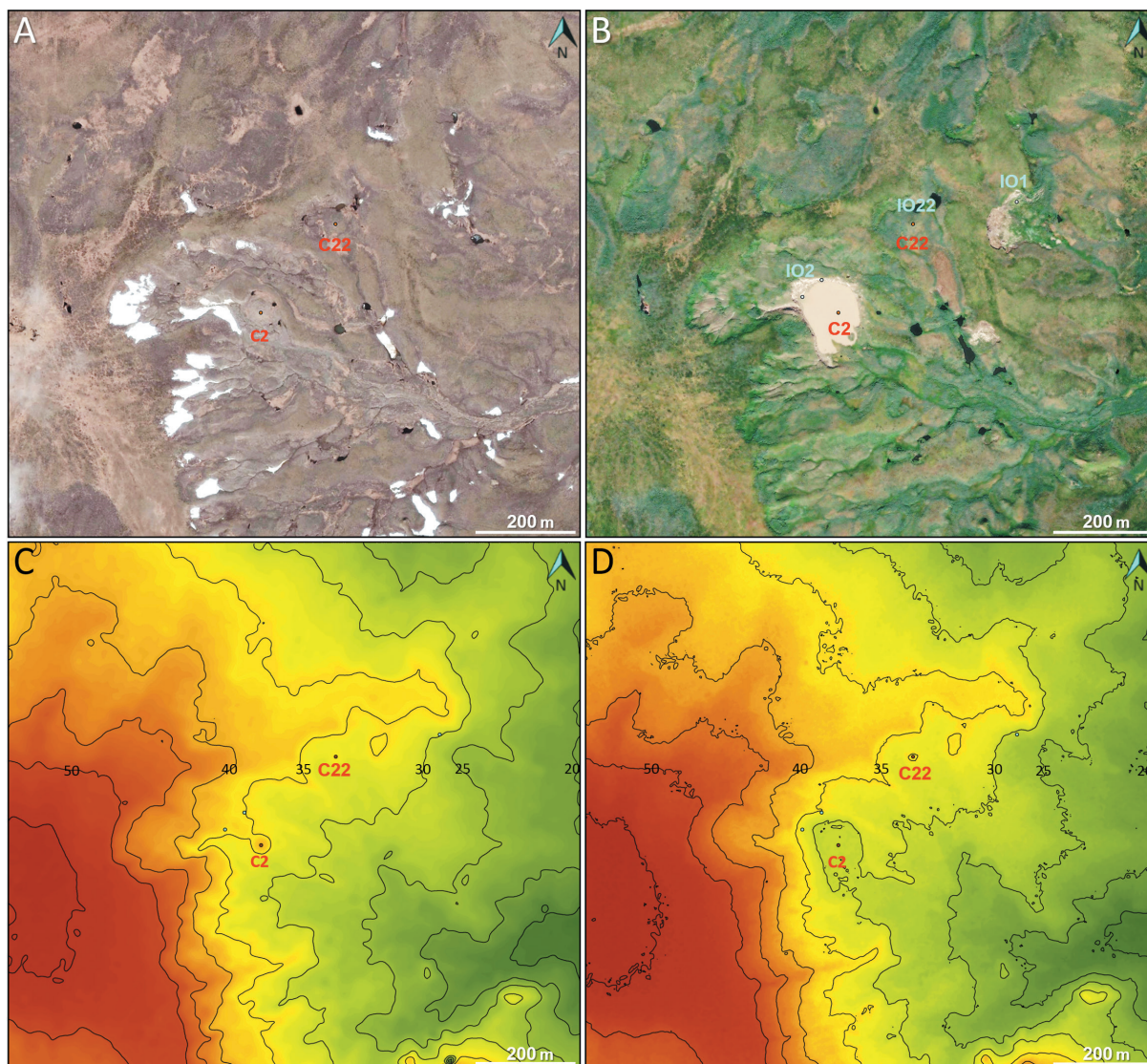


Рис. 1. Район исследований на космоснимках QB-2 4 июля 2009 г. (A), WV-2 23 июля 2023 г. (B) (база данных ESRI) и ЦМР ArcticDEM по данным WV-1 11 сентября 2011 г. (C) и WV-2 1 июня 2023 г. (D). Обозначения: C2 и C22 — объекты взрывов газа; IO1, IO2, IO22 — обнажения подземного льда
Fig. 1. Study area on satellite images QB-2 of July 4, 2009 (A), WV-2 of July 23, 2023 (B) from ESRI database and digital elevation model ArcticDEM based on WV-1 of September 11, 2011 (C) and WV-2 of June 1, 2023 (D). Legend: C2 and C22 —gas blowout sites; IO1, IO2, IO22 — ground ice outcrops

новые залежи обнаружены в широком стратиграфическом диапазоне от палеозоя до верхнего мела включительно.

Район работ расположен южнее территории Бованенковского лицензионного участка в пределах террас, образованных морскими и ледово-морскими четвертичными породами казанцевской и салехардской свит песчано-глинистого состава, перекрытых комплексом склоновых делювиально-солифлюкционных отложений. Регион характеризуется сплошным распространением многолетнемерзлых пород (ММП), толща которых изучена по данным бурения более 70 мерзлотно-параметрических скважин ООО НТФ «Криос» (по заказу ОАО «Газпром», ныне — ПАО «Газпром») и всех нефтегазопроисловых и разведочных скважин [21—27]. Мощность ММП

в основном составляет до 140—300 м, в центральной части Ямала — до 500 м, а на поймах крупных рек — от 0 до 150 м [27].

Район Бованенковского НГКМ характеризуется широким распространением массивов подземного льда, в основном расположенных в возвышенных частях рельефа местности в пределах третьей морской террасы [21—23]. Крупные залежи льда видимой мощностью до 15—20 м обнаружены «в средне- и верхнеплейстоценовых морских и ледниково-морских отложениях суглинисто-глинистого состава» в долинах реки Мордыяха [23]. На Харасвайском и Арктическом месторождениях при бурении трех скважин вскрыты пластовые залежи льда мощностью до 60 м, залегающие на песчаных пластах большой мощности [23, с. 23]. На дне непро-



Рис. 2. Кратер выброса газа С22 14 мая 2024 г. Вид из вертолета (А, В) и с бруствера (С). Фото В. И. Богоявленского
Fig. 2. Gas blowout crater C22, May 14, 2024. View from a helicopter (A, B) and from the parapet (C). Photos by V. I. Bogoyavlensky

мерзающих термокарстовых озер существуют талики, которые при больших размерах озер могут быть сквозными. Сквозные талики благоприятны для интенсивной вертикальной миграции газа, обнаруженной по данным ДЗЗ в 4898 зонах в виде подводных кратеров на дне 3551 озера полуострова Ямал [20].

Бурением многих скважин НТФ «Криос» доказана высокая газонасыщенность мерзлых отложений Ямала, включая залежи газа в свободном и гидратном состояниях, в том числе в криопэгах. По данным специалистов ООО «Газпром ВНИИГАЗ», «реликтовые (метастабильные) газогидраты в криолитозоне имеют практически повсеместное распространение» [27]. Во время бурения с глубин 10—210 м (в основном 60—120 м) многократно происходили выходы газа с максимальным дебитом до 10—14 тыс. м³/сут [22; 24—27]. Большая часть вскрытых газосодержащих слоев (80,6%) относится к салехардской свите

[22]. Газ преимущественно метанового состава (в основном 88—96%) [22]. На Бованенковском НГКМ рекордный объем разгрузки залежи газа на глубине 72—80 м составил около 300 тыс. м³ за 550 сут (куст 64) [22, с. 273].

Кратеры С2 и С22 расположены в 20 км юго-восточнее аэропорта Бованенково и в 10,5 км восточнее магистрального газопровода высокого давления «Бованенково — Ухта». Они находятся в 1,3 км северо-западнее крупного (0,93×1,6 км) озера Нюдимдато, в 2,6 км юго-западнее реки Мордыяха и примерно в 4,6 км к востоку от Кратерного озера, описанного в [7].

Методы дистанционных исследований

Для исследований всех целевых объектов используется широкий спектр доступных данных дистанционного зондирования Земли из космоса,

получаемых отечественными и зарубежными аппаратами. Общедоступные космоснимки (КС) среднего разрешения (например, Sentinel и Landsat) позволяют определить временной интервал возникновения чрезвычайного события, включая выбросы газа и взрывы МБП с образованием кратеров. КС высокого разрешения (например, WorldView (WV), GeoEye (GE), QuickBird (QB), PlanetScope (PS), Ресурс-П, Канопус-В) позволяют проводить детальный анализ процессов на месте чрезвычайных событий [1; 2; 6—20].

Большую пользу в исследованиях изменений поверхности Земли, в том числе за счет деградации ММП, приносят цифровые модели рельефа (ЦМР), получаемые при фотограмметрической обработке КС высокого разрешения [9—19; 29—32]. В Полярном геопространственном центре PGC (Polar Geospatial Center, <http://www.pgc.umn.edu>) Университета Миннесоты при поддержке Национального научного фонда NSF (National Science Foundation, США) на основе фотограмметрической обработки КС субметрового разрешения (0,32—0,5 м) WV-1, WV-2, WV-3 и GE-1 созданы высококачественные ЦМР ArcticDEM с разрешением 2 м, доступные с сентября 2018 г. [29; 30]. Это в 2,5 раза выше, чем в ранней версии, доступной с сентября 2017 г., в которой разрешения составляли 5 и 2 м/пикс.

Итоговая мозаика ЦМР ArcticDEM покрывает всю сушу Циркумарктического региона (около 23,1 млн км²) до широты 60°, а в отдельных местах (на Камчатке, Алеутских островах и на Аляске) — почти до 50° [30]. При этом для территории Арктики доступна единая ЦМР, собранная в виде мозаичных тайлов (tiles — участки 100×100 км), сабтайлов (subtiles — 50×50 км). Кроме того, в ArcticDEM версии 4.1 доступно около 548 тыс. 16-летних (2007—2023 гг.) полос пролетов спутников — стрипов (strips) длиной 110—120 км и шириной 13—17 км с сохраненной датировкой исходных КС [29].

Авторы накопили большой опыт работы с ЦМР ArcticDEM для решения различных задач, базирующийся на специальных технологиях комплексного анализа и обработки тайлов и стрипов ЦМР, подробно рассмотренных в [11; 12], а также при мониторинговых исследованиях ряда локализованных объектов выбросов газа в виде кратеров [9—19]. ЦМР ArcticDEM также привлекает внимание ряда других исследователей, считающих их достаточно точными и имеющими наилучшее пространственное разрешение [31; 32].

Необходимо отметить установленный нами ранее факт, что практически все ЦМР ArcticDEM в разной степени далеки от совершенства, что обусловлено в основном погрешностями автоматической пространственной привязки результатов расчетов, наличием отдельных выбросов и фактической невозможностью работы по открытым водоемам [12; 15; 17]. В связи с этим решение сложных мониторинговых задач, включая анализ темпов роста МБП, требует дополнительной пространственной коррекции

ЦМР ArcticDEM, заключающейся во взаимной увязке входных стрипов по горизонтали и вертикали, что мы делали ранее для объектов C1 [12], C2, C15 [17], C17 [15; 16] и др.

Во время экспедиций при изучении локальных объектов (например, бугров пучения, карстов и кратеров) мы применяем аэрофотосъемку из вертолетов и с применением БПЛА [9—19]. Эти данные ДЗЗ позволяют не только сохранять и анализировать цифровые аэрофотоснимки изучаемых объектов в высоком разрешении, но и строить с высокой точностью характеризующие их трехмерные (3D) ЦМР. С этой целью выполняется цифровая фотограмметрическая обработка аэрофотоснимков с применением специализированного программного обеспечения (ПО) Agisoft Metashape Professional (Agisoft LLC, ГК «Геоскан», Россия) [33], зарекомендовавшего себя лучшими результатами, чем Pix4Dmapper (Pix4D SA, Швейцария). Картографические изображения и построения 3D-моделей осуществляются с применением ПО ArcGIS (ESRI, США).

Результаты аэрокосмических исследований объекта C22

Мониторинговые исследования по данным ДЗЗ из космоса и БПЛА

Анализ ЦМР ArcticDEM 2011 и 2023 гг. (см. рис. 1С, 1D) показал, что МБП C2 и C22 образовались в сходных геоморфологических условиях на склонах третьей морской террасы. Перепад высот рельефа местности в районе работ составляет 12—57 м, снижается в юго-восточном направлении до 12—15 м. Отметим, что приведенные ЦМР ArcticDEM 2011 и 2023 гг. хорошо согласуются, хотя имеют разные разрешения (5 и 2 м), что видно на рис. 1С, 1D.

Определение даты взрыва МБП C22, приведшего к образованию кратера, проведено на основе анализа данных ДЗЗ с космического аппарата Sentinel-2. В период с 2 июля 2023 г. по 29 июля 2024 г. были выбраны 8 наиболее кондиционных КС, фрагменты которых для участка размером 480×600 м приведены на рис. 3. Выбранный участок охватывает оба объекта C22 (в центре участка) и C2, превратившегося в термокарстовое озеро (в левом нижнем углу). Из приведенного набора фрагментов кондиционных КС Sentinel-2 видно, что кратер C22 впервые стал виден 3 сентября 2023 г., а на КС 26 августа 2023 г. он отсутствовал. Таким образом, установлено, что взрыв МБП C22 произошел в 8-дневный период с серединой 30 августа (± 4 сут). Летом 2024 г. на КС наблюдается расширение кратера.

Согласно базе данных ArcticDEM [29], для нашего района исследований доступно рекордно большое количество — 14 разновременных полос ЦМР (стрипов) за продолжительный 13-летний диапазон роста МБП 2011—2023 гг. Эти ЦМР были построены по зимним и летним КС WV-1, WV-2 и WV-3, включая: 1 КС в 2011 г., 2 — в 2013 г., 4 — в 2016 г., 2 — в 2017 г., 1 — в 2018 г., 2 — в 2019 г., 1 — в 2020 г. и 1 — в 2023 г. Очевидно, что наличие

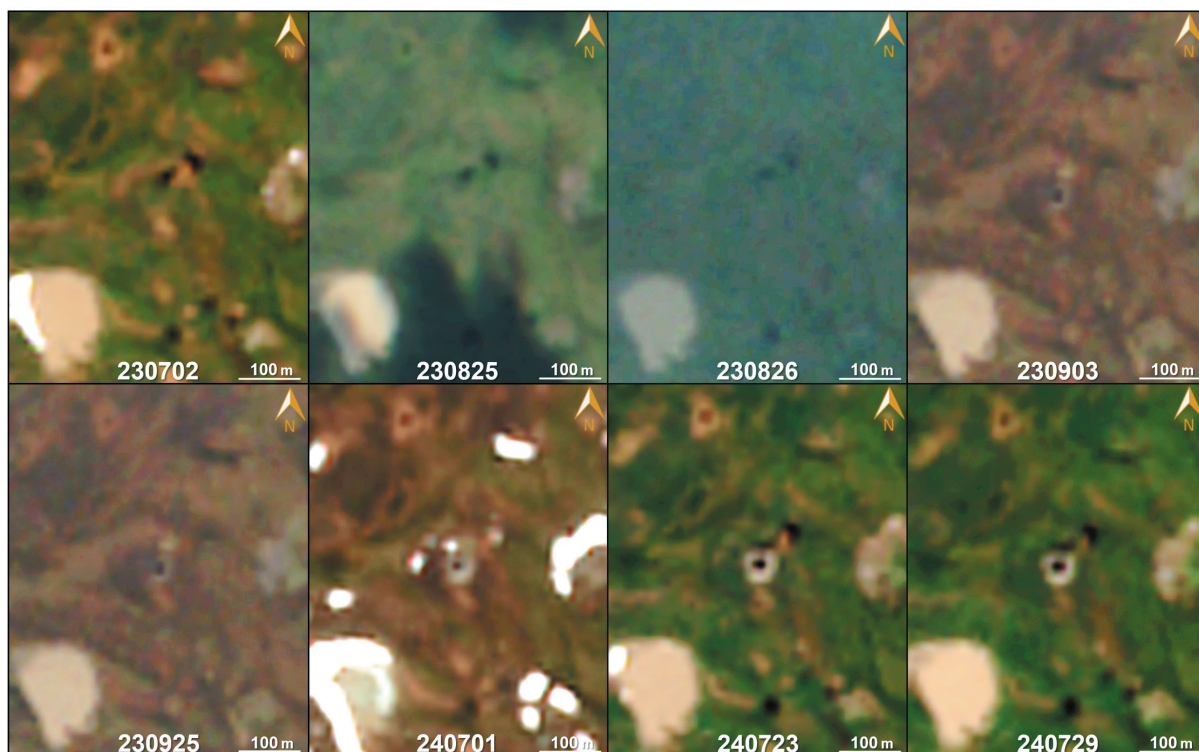


Рис. 3. Мониторинг состояния объекта С22 по космоснимкам спутника Sentinel-2 в 2023–2024 гг.
Fig. 3. Monitoring of the C22 object state using the Sentinel-2 satellite images in 2023–2024

снежного покрова существенно искажает (сглаживает) объекты на ЦМР. В связи с этим предпочтение было отдано летним КС. Однако и в летнее время ЦМР могут отличаться в связи с изменениями растительности (трава и листья на обширно растущем кустарнике). На рис. 4 приведены выбранные 7 ЦМР ArcticDEM: 11 сентября 2011 г., 21 июля 2013 г., 27 июня 2016 г., 30 июня 2017 г., 1 июля 2018 г., 27 мая 2020 г. и 1 июня 2023 г. Предварительно данные ЦМР были подвергнуты взаимной пространственной увязке для устранения погрешностей, как отмечалось выше и в работах [12; 15–17].

Из ЦМР ArcticDEM на рис. 4 видно, что в период с 11 сентября 2011 г. по 1 июня 2023 г. произошел существенный рост МБП с примерно 1,5 до 3,0 м. Основной прирост МБП с 1,7 до 3,0 м (1,3 м) пришелся на период с 27 мая 2020 г. по 1 июня 2023 г. Таким образом, в последние три года среднегодовой рост МБП составил около 0,4 м.

Ввиду отсутствия ЦМР ArcticDEM после взрыва МБП произведено ее моделирование на основе 26 аэрофотоснимков, сделанных 14 мая 2024 г. с БПЛА при самом верхнем уровне полетов (около 60 м). В этом случае обнажившаяся при взрыве МБП С22 верхняя часть кратера отображается в виде корректной ЦМР, а дно и боковые стенки полости корректно не построены из-за эффекта «черной дыры» (невидимости или плохой видимости), как это было и при обработке аэрофотоснимков БПЛА на Бованенковском объекте С17 [15; 16]. Дополнительную погрешность в ЦМР привносит снежный покров,

высота которого 14 мая достигала вокруг кратера 1 м, а в зоне его внутреннего склона — местами до 4–5 м с учетом снежного заноса (см. рис. 2). В итоге фотограмметрической обработки аэрофотоснимков построена ЦМР для кратера С22, приведенная на рис. 4.

В связи с расположением МБП С22 на склоне морской террасы приведенное выше определение высоты бугра на основе ЦМР (см. рис. 4) может быть неточно. Более детальный и точный анализ изменений размеров бугра возможен при устранении влияния площадной составляющей ЦМР, что требует ее синтезирования на время «Х» до появления бугра. С этой целью была проведена коррекция исходной ЦМР за 2011 г. путем интерполяции изолиний с игнорированием их ундуляций за счет наличия бугра. На следующем этапе скорректированная ЦМР «Х» вычиталась из каждой разновременной ЦМР (см. рис. 4), при этом были получены разностные массивы ЦМР, представленные на рис. 5.

По разностным ЦМР (см. рис. 5) видно, что региональная составляющая была устранена, о чем свидетельствует уровень до $\pm 0,5$ м на большей части фрагментов вокруг бугра. Исключением являются большие отклонения ЦМР 2024 г., построенной по данным БПЛА, что объясняется погрешностями расчета ее периферийных частей из-за сплошного снежного покрова без обособленных объектов, которые могут использоваться для формирования облака точек при фотограмметрической обработке.

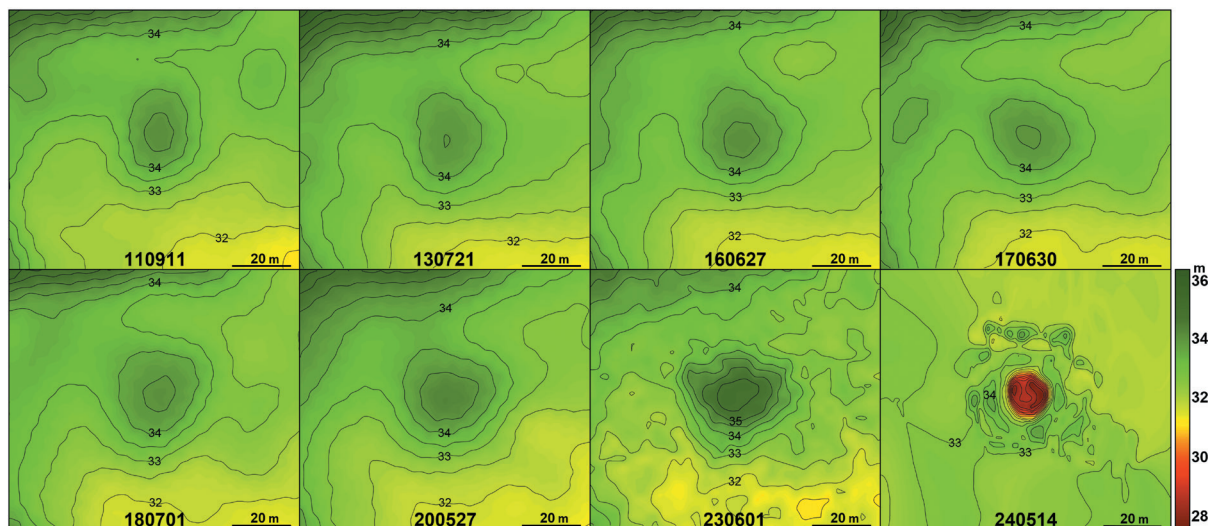


Рис. 4. ЦМР ArcticDEM объекта C22 за период 2011–2023 гг. и БПЛА 2024 г.
Fig. 4. DEMs from ArcticDEM for the C22 object for the period 2011–2023 and from the UAV in 2024

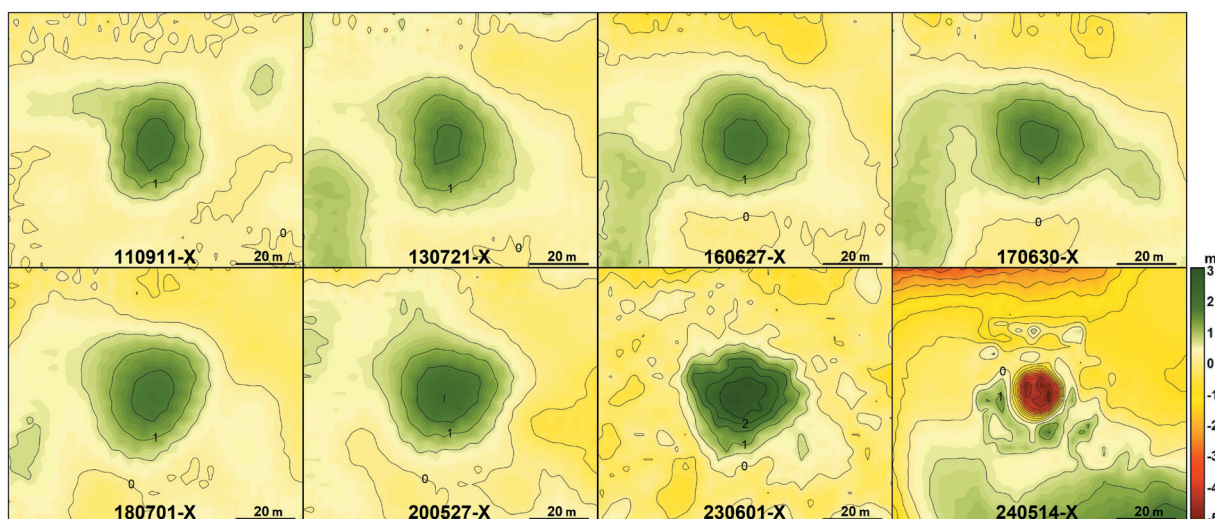


Рис. 5. Разностные ЦМР объекта C22 на основе ArcticDEM за период 2011–2023 гг. и БПЛА 2024 г.
Fig. 5. Differential DEMs for the C22 object based on ArcticDEM for the period 2011–2023 and from the UAV in 2024

По разностным ЦМР (см. рис. 5) можно с более высокой точностью определить фактические размеры МБП, искаженные на рис. 4 наклоном поверхности земли и ее локальными осложнениями. Согласно ЦМР (см. рис. 5) хорошо видимые размеры МБП C22 в 2011 г. были в основании — 34×45 м при высоте 1,59 м, а в 2023 г. они достигли 45×55 м при высоте 3,02 м.

Построение трехмерной модели кратера и полости объекта C22 по данным БПЛА

Необходимо отметить, что проведение аэрофотосъемки с БПЛА 14 мая 2024 г. (оператор И. В. Богоявленский) отличалось сложными погодными условиями с сильным ветром и снегом, из-за чего управление аппаратом неоднократно терялось и произошли три его аварийные посадки с поломками четырех комплектов лопастей и од-

ной опорной ноги. По данным метеостанций Бованенково и Марресале, скорость западного ветра составляла от 8 до 13 м/с при температуре воздуха -3°C (<https://goodmeteo.ru/pogoda-bovanenkovo-yamalskiy-yamalo-nenetskiy/14-5/>, <https://pogoda.mail.ru/prognoz/marresale/14-may/#2024>). Несмотря на это, было сделано 238 кондиционных аэрофотоснимков на уровнях полета над землей от 1—2 до 60 м. Направление БПЛА внутрь полости, как это было сделано на объекте C17 [16; 17], однозначно привело бы к его потере. Однако часть аэрофотоснимков на самом нижнем уровне полета позволила получить информацию о внутреннем строении полости C22.

При комплексной обработке в ПО Agisoft Metashape Professional 238 аэрофотоснимков была построена 3D-модель поверхности земли, кратера и полости, отображенная на рис. 6 в трех ракурсах

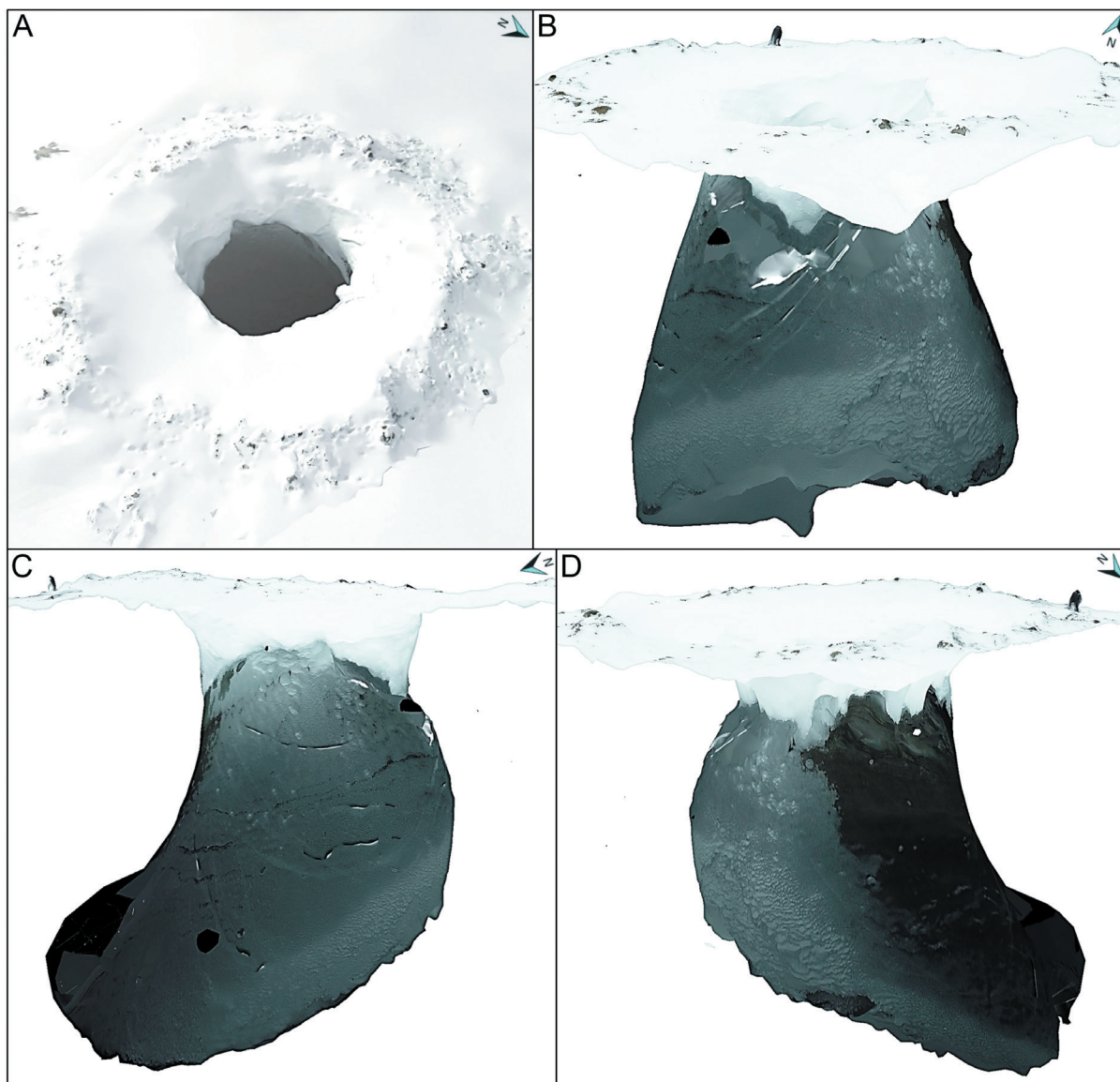


Рис. 6. Трехмерная модель объекта С22 после обработки данных БПЛА 14 мая 2024 г.
Fig. 6. 3D model of the C22 object after the UAV data processing on May 14, 2024

(для масштаба сохранены два рядом стоящих человека). Анализ этой модели позволил установить, что дно полости в разной степени занесено снегом, минимально — в северо-западном направлении и наиболее сильно в юго-восточном (см. рис. 2 и 6). Максимальная глубина дна заснеженной полости от уровня бруствера в северо-западной части составила 28,5 м, а юго-восточной части — около 22 м. Весьма вероятно, что глубина грунта на дне полости превышает 30 м. Диаметр верхней кромки бруствера кратера — 30 м. Конические склоны кратера занесены снегом на высоту до 5 м, при этом снег частично нависает в виде карнизов над горловиной кратера. Горловина расположена в массиве льда на глубине 6—8 м, ее диаметр — от 12,2 до 13,2 м (в среднем 12,7 м). Данная 3D-модель также позволила представить объект С22 в виртуальной реальности.

Обсуждение результатов

Несмотря на частичное заполнение полости снегом 14 мая 2024 г. (см. рис. 2 и 6), хорошо видно, что полость сформировалась в массиве подземного льда, доказанная бурением мощность которого в районе исследований может достигать 60 м [23]. В субширотном направлении в нижней части полость расширяется с примерно 12,7 м в горловине до 26 м (см. рис. 6В). Северо-западная часть дна полости С22 мало занесена снегом, что позволяет видеть на 3D-модели ее вытянутость не менее чем на 8 м в направлении NNW по азимуту около 341° (см. рис. 6С и 6D). Дно полости хорошо аппроксимируется эллипсом размером не менее 26×33 м. Противоположная сторона полости очень сильно занесена снегом, что полностью скрывает ее строение в нижней части. Однако с учетом опыта, по-

лученного нами при изучении объекта С17 [15; 16], мы предполагаем, что дно полости С22 расширяется в двух взаимно противоположных направлениях NNW и SSE и имеет эллиптическую форму размером около 26×41 м.

Отметим, что ориентация главной оси эллипса С17 350° отличается от ориентации вытянутого дна полости С22 всего на 9°. Эти направления хорошо согласуются с ориентацией основных разломов в районе Бованенковского НГКМ, выявленных по данным сейсморазведки в юрско-меловом комплексе (в основном $353 \pm 6^\circ$), а также азимуту $342 \pm 1^\circ$ основной оси антиклинальной складки этого месторождения по кровле продуктивной залежи сеномана [15; 16; 34]. Взрыву с образованием кратера подверглась лишь сводовая часть МБП С22, в связи с чем диаметр горловины полости (около 12,7 м) значительно меньше размеров ее основания (от 26 до 33—41 м).

В 2015 г. в июле и августе-сентябре нами были проведены два этапа экспедиционных исследований объекта С2, результаты которых в совокупности с данными ДЗЗ позволили установить следующее [9]: до 2012 г. на месте взрыва существовал МБП диаметром около 60—63 м и площадью около 3 тыс. м²; в 2015 г. вокруг термокарстового озера размером 95×125 м были обнаружены многочисленные небольшие озера импактного характера (диаметр до 8—10 м), образовавшиеся из-за падения огромных кусков мерзлой породы и ледогрунта; в северной части озера на крутом берегу высотой до 8 м «под маломощным (1—5 м) почвенным покровом выявлено протяженное (около 40 м) обнажение подземного массива кристалльно чистого льда» (см. рис. 1 — Ю2); при взрыве разлет кусков породы и ледогрунта достигал 370 м; за четырехлетний период 2013—2017 гг. площадь зеркала воды увеличилась в 2,84 раза (с 4370 до 12 410 м²) [9]. При осмотре района в 470 м к северо-востоку от озера С2 найдена зона активных термоденудационных процессов с образованием термоцирка с обнажением подобного чистого льда (см. рис. 1 — Ю1). Этот термоцирк расположен всего в 150 м к востоку от кратера С22. С учетом вскрытия льда Ю22 при взрыве на объекте С22 можно предположить практически повсеместное распространение массива подземного льда, приуроченного к морской террасе в районе исследований объектов С2 и С22.

По данным разностных ЦМР ArcticDEM за 2011—2023 гг. (см. рис. 5) установлено, что в основании горизонтальные размеры МБП С22 в 2023 г. достигли 45×55 м, а высота — 3,02 м. Его размеры существенно меньше, чем С1 (62×65 м, высота 6,1 м) и С2 (60×63 м, высота 5,7 м). С учетом кусков мерзлой породы и импактных объектов можно утверждать, что из трех рассмотренных выше МБП самым мощным был взрыв на объекте С2, а самым слабым — на С22.

Детальный анализ результатов мониторинга роста МБП С22 по разностным массивам ЦМР (см.

рис. 5) позволил определить его высоты с высокой точностью: 1,59 м в 2011 г.; 1,34 м в 2013 г.; 1,27 м в 2016 г.; 1,37 м в 2017 г.; 1,52 м в 2018 г.; 1,7 м в 2020 г. и 3,02 м в 2023 г.

Фактическое отсутствие роста МБП С22 в 2011—2016 гг. и даже снижение его высоты в 2013—2016 гг. на 25—32 см (с 1,59 до 1,27 м) может быть объяснено снижением пластового давления за счет выброса газа через открытый канал взорвавшегося в 2012 г. МБП С2. Близость объектов С22 и С2 (между их вершинами всего 230 м, а между краями — 180 м) подразумевает единый источник поступления газа, которым в ММП может быть песчаный пласт с газом, растворенным в соленой воде (криопэг). Эти песчаные пласты обычно подстилают или облекают пластовые залежи льда [23; 35]. При этом лед является хорошей покрывкой для вертикальной миграции газа.

Начиная с 2016 г. до 2020 г. наблюдается рост бугра со средней скоростью около 11 см/год. Судя по всему, после 2016 г. давление в полости МБП С22 вновь стало расти, что предположительно связано с герметизацией канала выхода газа на объекте С2. В течение трех лет до взрыва МБП С22 (2020—2023 гг.) были зафиксированы аномально высокие темпы его роста с 1,7 до 3,02 м — в среднем 44 см/год.

Подобная ситуация интенсивного роста МБП наблюдалась нами на космоснимках Сеяхинского объекта С11, выросшего в русле реки Мюджрияха и взорвавшегося 27 июня 2017 г. [18; 19]. Однако для объекта С11 было доступно лишь ограниченное количество разновременных ЦМР (до взрыва только 2013 и 2016 гг.), не позволяющее делать корректный статистический анализ. Максимальная скорость роста МБП С17 в 2011—2017 гг. достигала около 20 см/год при средней скорости около 8 см/год [15; 16].

Высокая скорость роста объекта С22 44 см/год не характерна для МБП криогенного типа (закрывающаяся система). По данным J. R. Маскау скорость роста классических МБП/pingo в Канаде обычно измеряется первыми сантиметрами в год: в [36; 37] в основном упоминаются скорости роста от 1 до 15 см/год, а для одного из крупнейших МБП Ibyuk Pingo — максимум 2,3 см/год [36]. Аномальный рост МБП Pingo-17 в 47 см/год был объяснен интенсивным притоком воды в линзу под ледяным ядром [37], что характерно для МБП с открытой гидродинамической системой артезианского типа. Именно с открытой газогидродинамической системой мы имеем дело на объектах С22 и С2 и их аналогах.

На основе выполненного анализа можно считать, что аномально высокая скорость роста МБП С22 за три года до взрыва около 44 см/год может служить серьезным диагностическим признаком (предвестником) грядущего взрыва МБП, но не эксклюзивным. В этом направлении необходимы дополнительные мониторинговые исследования с применением ЦМР

по данным ArcticDEM и/или периодическими съемками с БПЛА. Не вызывает сомнений, что весьма полезным может быть радиолокационное обнаружение аномальной динамики роста МБП [38].

Считаем необходимым отметить, что одна из пространственных ошибок ряда исследователей процесса образования кратера заключается в восприятии его формы в цилиндрическом виде, как это иногда представляется на аэрофотоснимках, сделанных с большого расстояния. При этом некоторые исследователи по-прежнему предполагают, что при взрыве МБП выбрасывается большой объем мерзлых пород: «...породный цилиндр при движении вверх не может сохраниться как целое. При движении он последовательно разрушается вблизи дневной поверхности как за счет особенностей напряженного состояния, что следует из расчетов, так и за счет газодинамического фактора, связанного с десорбцией метана из фильтрационных каналов» [39].

Как видно из 3D-модели рис. 6, полость МБП С22 далека от цилиндрической, она сложна, асимметрична и расширяется книзу по отношению к горловине кратера в субширотном направлении как минимум в два раза (см. рис. 6В), а в направлении NNW — почти в три раза (см. рис. 6С, 6D). Далеки от цилиндрической формы и имели расширения в нижней части также полости других исследованных объектов (С1, С3, С5, С12, С17). Хорошо видимые конические зоны разрывов мерзлой породы и ледогрунта в верхней части всех кратеров и гладкие стенки полости в массиве подземного льда с небольшими уплощенными углублениями за счет его неравномерного таяния (плавления) однозначно свидетельствуют, что перед взрывом МБП С22 его полость была наполнена газом с сверхвысоким/сверхлитостатическим давлением. Это было нами детально рассмотрено и обосновано ранее, в том числе при математическом и физическом моделировании, а также в обобщающих работах [13; 14].

Газ, заполнивший полость С22 и других подобных объектов, может иметь различный генезис, включая: генерируемый *in situ*, растворенный в криопэгах, в гидратном или свободном состояниях внутри мерзлотных и подмерзлотных залежей, мигрирующий по разломам из глубоких резервуаров и смешанный [19—20; 22; 24—27]. В частности, под толщами газогидратов и/или ММП (нередко и внутри ММП) накапливаются большие объемы газа в свободном состоянии и возникают аномально высокие или даже сверхлитостатические давления, способные прорвать природный экран в самой тонкой части кровли полости [13; 14].

Заключение

Выполнено комплексное исследование Дуплетного объекта С22 катастрофического взрыва газа в 2023 г. в центральной части полуострова Ямал в 12,7 км южнее Бованенковского месторождения

на основе комплексного анализа данных ДЗЗ из космоса и с применением БПЛА. Уникальность объекта С22 заключается в его расположении всего примерно в 200 м от подобного широко известного объекта С2, взорвавшегося в 2012 г., в связи с чем объект С22 получил название Дуплетный. Подобной ситуации ранее не наблюдалось.

На основе данных серии космоснимков Sentinel-2 установлено, что взрыв МБП С22 произошел в узком восьмидневном временном интервале с 26 августа по 3 сентября 2023 г. К середине лета 2024 г. стенки кратера значительно расширились, а полость частично заполнилась водой.

По данным ЦМР ArcticDEM за период 2011—2023 гг. определены особенности изменений размеров МБП С22, включая снижение его высоты в 2013—2016 гг., что может быть связано с падением давления газа в полости из-за выброса газа на близлежащем объекте С2 осенью 2012 г. Начиная с 2016 г. наблюдается рост МБП С22, в том числе с аномально высокой средней скоростью 44 см/год за трехлетний период (2020—2023 гг.) до его взрыва. Обосновано, что такие высокие темпы роста могут быть предвестником грядущего взрыва и являются одним из критериев выявления взрывоопасных объектов.

По данным аэрофотосъемки с БПЛА 14 мая 2024 г. сделано 238 кондиционных аэрофотоснимков, по которым в результате фотограмметрической обработки построена 3D-модель поверхности земли, кратера и полости, также представленная в виртуальной реальности. Установлено, что взрыв МБП произошел в верхней части полости, образовавшейся в мощном массиве подземного льда. Глубина частично занесенной снегом полости не менее 30 м. Доказано, что в нижней части полость расширяется более чем в два раза по отношению к горловине кратера и распространяется не менее чем на 33 м в направлении NNW по азимуту около 341°, что хорошо согласуется с направлением разломов Бованенковского месторождения, выявленных по данным сейсморазведки.

Показано, что мощные выбросы/взрывы газа из криолитосферы могут привести к катастрофическим изменениям природного ландшафта и нанести большой урон объектам нефтегазовой отрасли.

Полученные результаты относятся к приоритетным направлениям научно-технологического развития в части «сохранение и рациональное использование природных ресурсов» и входят в перечень критических технологий «мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды..., предупреждения и снижения рисков чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [40, п. 7, 19 и 20]. Исследования имеют междисциплинарный характер на основе знаний в областях геологии, геофизики, геохимии, геокриологии, геоморфологии, гляциологии, гидрогеологии, геоэкологии, вулканологии, сейсмологии, спелеологии и др.

Финансирование

Работа выполнена по госзаданию ИПНГ РАН по теме «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата» (№ 122022800264-9).

Благодарность

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

Авторы благодарят главного инженера — первого заместителя генерального директора ООО «Газпром добыча Надым» В. Н. Полозова и заместителя начальника Инженерно-технического центра ООО «Газпром добыча Надым» А. Б. Осокина за полезные обсуждения результатов исследований.

Литература/References

1. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // Бурение и нефть. — 2014. — № 9. — С. 13—18.
Bogoyavlensky V. I. The threat of catastrophic gas blowouts from the Arctic cryolithozone. Yamal craters. Oil and Drilling, 2014, no. 9, pp. 13—18. (In Russian).
2. Богоявленский В. И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов: Монография // Тр. ВЭО России, 2014. — Т. 182, № 3. — С. 12—175.
Bogoyavlensky V. I. Arctic and the World Ocean: current state, perspectives and challenges of hydrocarbon production. Trudy Vol'nogo ekonomicheskogo obshchestva, 2014, vol. 182, no. 3, pp. 12—175. (In Russian).
3. 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.
Epov 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).
4. Leibman M. O., Kizyakov A. I., Plekhanov A. V., Streletskaia 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—80.
5. Лейбман М. О., Кизяков А. И. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа. — 2016. — № 2. — С. 15—24.
Leibman M.O., Kizyakov A.I. A new natural phenomenon in the permafrost zone. Nature, 2016, no. 2, pp. 15—24. (In Russian).
6. Лаверов Н. П., Богоявленский В. И., Богоявленский И. В. Фундаментальные аспекты рационального освоения ресурсов нефти и газа Арктики и шельфа России: стратегия, перспективы и проблемы // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 2 (22). — С. 4—13.
Laverov N. P., Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V. Fundamental aspects of rational development of oil

- and gas resources in the Arctic and Russian shelf: strategy, prospects and challenges. Arctic: Ecology and Economy, 2016, no. 2 (22), pp. 4—13. (In Russian).*
7. 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 manifestations and gas emissions in the Arctic: Yamal Peninsula. Arctic: Ecology and Economy, 2016, no. 3 (23), pp. 4—13. (In Russian).
 8. Богоявленский В. И., Гарагаши И. А. Обоснование процесса образования кратеров газового выброса в Арктике математическим моделированием // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 3 (19). — С. 12—17.
Bogoyavlensky V. I., Garagash I. A. Substantiation of the process of formation of gas emission craters in the Arctic by mathematical modeling. Arctic: Ecology and Economy, 2015, no. 3 (19), pp. 12—17. (In Russian).
 9. 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.
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. Arctic: Ecology and Economy, 2017, no. 3 (27), pp. 4—17. (In Russian).
 10. Богоявленский В. И. Газогидродинамика в кратерах выброса газа в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 1 (29). — С. 48—55.
Bogoyavlensky V. I. Gas-hydrodynamics in the Arctic craters of gas blowout. Arctic: Ecology and Economy, 2018, no. 1 (29), pp. 48—55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55. (In Russian).
 11. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Мажаров А. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сейяхинского выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 1 (33). — С. 88—105.
Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Mazharov A. V., Bogoyavlensky I. V. et al. Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the Seyakha catastrophic gas emission on the Yamal Peninsula. Arctic: Ecology and Economy, 2019, no. 1 (33), pp. 80—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105. (In Russian).
 12. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н., Никонов Р. А. Цифровые технологии дистанционного выявления и мониторинга развития бугров пучения и кратеров катастрофических выбросов газа в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 4 (40). — С. 90—105.
Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N., Nikonov R. A. Digital technologies for remote detec-

- tion 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).
13. 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, no. 1 (149), pp. 97—118. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118. (In Russian).
14. 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).
15. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н. Катастрофический выброс газа в 2020 г. на полуострове Ямал в Арктике. Результаты комплексного анализа данных аэрокосмического зондирования // *Арктика: экология и экономика*. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 362—374.
Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N. Catastrophic gas blowout in 2020 on the Yamal Peninsula in the Arctic. Results of comprehensive analysis of aerospace RS data. Arctic: Ecology and Economy, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 362—374. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-362-374. (In Russian).
16. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al. New Catastrophic Gas Blowout and Giant Crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the Expedition and Data Processing. *Geosciences*, 2021, 11, 71. p. 20. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences11020071>.
17. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А., Каргина Т. Н. Мониторинг развития Мордыхского объекта взрыва газа на Ямале на основе данных дистанционного зондирования Земли // *Арктика: экология и экономика*. — 2022. — Т. 12, № 4. — С. 513—523.
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, 2021, vol. 12, no. 4, pp. 513—523. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-4-513-523. (In Russian).
18. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al. Permanent Gas Emission from the Seyakha Crater of Gas Blowout, Yamal Peninsula, Russian Arctic. *Energies*, 2021, 14, p. 5345. Available at: <https://doi.org/10.3390/en14175345>.
19. 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>.
20. 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).
21. Крицук Л. Н. Подземные льды Западной Сибири. — М.: Науч. мир, 2010. — 352 с.
Kritsuk L. N. Underground ice of Western Siberia. Moscow, Scientific world, 2010, 352 p. (In Russian).
22. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: Монография: В 3 т. — Т. 2: Криосфера Бованенковского нефтеконденсатного месторождения / Под общ. ред. Ю. Б. Баду, 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 vol. Vol. 2. Cryosphere of the Bovanenkovo oil and condensate field. Under the general direction. Eds. Yu. B. Badu, N. A. Gafarova, E. E. Podborny. Moscow, Gazprom Expo LLC, 2013. 421 p. (In Russian).
23. 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).
24. 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).
25. Чувиллин Е. М., Перлова Е. В., Баранов Ю. Б. и др. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. — М.: ГЕОС, 2007. — 137 с.
Chuvilin E. M., Perlova E. V., Baranov Yu. B. et al. Structure and properties of cryolithozone rocks in the southern part of the Bovanenkovo gas condensate field. Moscow, GEOS, 2007, 137 p. (In Russian).
26. 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).
27. Перлова Е. В., Микляева Е. С., Леонов С. А. и др. Газовые гидраты полуострова Ямал и прилегающего шельфа Карского моря как осложняющий фактор освоения региона // Вести газовой науки. — 2017. — № 3 (31). — С. 255—262.
- Perlova E. V., Miklyayeva E. S., Leonov S. A. et al. Gas hydrates of the Yamal Peninsula and the adjacent shelf of the Kara Sea as a complicating factor in the development of the region. News of gas science, 2017, no. 3 (31), pp. 255—262. (In Russian).
28. Kizyakov A., Khomutov A., Zimin M. et al. Microrelief Associated with Gas Emission Craters: Remote Sensing and Field-Based Study. Remote Sens., 2018, 10, p. 677. DOI: 10.3390/rs10050677.
29. 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>.
30. 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>.
31. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. Анализ возможности применения цифровых моделей рельефа ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для исследований арктических территорий России // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2020. — Т. 17, № 7. — С. 117—127.
- Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B. Analysis of the possibility of using digital terrain models ASTER GDEM v2 and ArcticDEM for research of the Arctic territories of Russia. Modern problems of remote sensing of the Earth from space, 2020, vol. 17, no. 7, pp. 117—127. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127. (In Russian).
32. Ultee L., Meyer C., Minchew B. Tensile strength of glacial ice deduced from observations of the 2015 eastern Skaftá cauldron collapse, Vatnajökull ice cap, Iceland. J. of Glaciology, 2020, 66 (260), pp. 1024—1033. Available at: <https://doi.org/10.1017/jog.2020.65>.
33. 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.
34. Скоробогатов В. А., Строганов Л. В., Копеев В. Д. Геологическое строение и газонефтеносность Ямала. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. — 352 с.
- Skorobogatov V. A., Stroganov L. V., Kopeev V. D. Geological structure and gas and oil content of Yamal. Moscow, LLC “Nedra-Business Center”, 2003, 352 p. (In Russian).
35. Васильчук Ю. К., Буданцева Н. А., Васильчук А. К. и др. Пластовые льды в голоценовых отложениях севера Западной Сибири // Криосфера Земли. — 2016. — Т. 20, № 1. — С. 36—50.
- Vasilchuk Yu. K., Budantseva N. A., Vasilchuk A. K. et al. Formative ice in Holocene deposits of the north of Western Siberia. Cryosphere of the Earth, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 36—50. (In Russian).
36. 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.
37. 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.
38. Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н., Кирбижекова И. И., Дмитриев А. В. Радиолокационное обнаружение аномальной динамики бугров пучения на примере Ямальского бугра/кратера 2020 г. // Докл. Акад. наук. Науки о Земле. — 2022. — Т. 506, № 1. — С. 65—72.
- Bondur V. G., Chimitdorzhiev T. N., Kirbizhekova I. I., Dmitriev A. V. Radar Detection of Anomalous Dynamics of Perennial Heaving Mounds from the Example of the Yamal Mound/Crater in 2020. Doklady Earth Sciences, 2022, vol. 506, no. 1, pp. 654—660. DOI: 10.1134/S1028334X22700015. (In Russian).
39. Оди́нцев В. Н., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А., Шиповский И. Е. Геомеханическая модель образования воронки на земной поверхности в зоне вечной мерзлоты // Гор. информ.-аналит. бюл. — 2021. — № 12-1. — С. 159—166.
- Odintsev V. N., Trofimov V. A., Filippov Yu. A., Shipovskii I. E. Geomechanical model of formation of sinkholes on ground surface in the permafrost zone. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull., 2021, no. 12-1, pp. 159—166. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_159. (In Russian).
40. Указ Президента РФ «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий» от 18 июня 2024 г. № 529. — URL: <http://kremlin.ru/acts/news/74328/>.
- Decree of the President of the Russian Federation “On approval of priority areas of scientific and technological development and the list of the most important science-intensive technologies” of June 18, 2024, no. 529. (In Russian).

Информация об авторах

Богоявленский Василий Игоревич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией «Шельф», главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: geo.ecology17@gmail.com.

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

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

DEVELOPMENT MONITORING OF THE C22 GAS BLOWOUT DOUBLET OBJECT ON YAMAL PENINSULA USING REMOTE SENSING DATA

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

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

For citing

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).

The article was received on July 11, 2024

Abstract

The paper presents a comprehensive study of the C22 gas blowout Doublet object formed in 2023 in the central part of Yamal peninsula carried out with the use of remote sensing (RS) data and unmanned aerial vehicle (UAV). The object is situated 12.7 km south of the Bovanenkovo field. The uniqueness of the C22 crater lies in its location — 230 m from a similar, widely-known C2 object exploded in 2012, which is why the C22 object is named 'Doublet'. Based on RS data the researchers have determined that within August 23 and September 3, 2023 the C22 permafrost heaving mound (PHM) exploded. According to ArcticDEM data for the period 2011-2023, the features of changes in the size of C22 PHM have been studied, including an abnormally high average growth rate of 44 cm/year three years before its explosion, which can serve as one of the criteria for identifying explosive PHM objects. The UAV data of May 14, 2024 has resulted in building a 3D model, which displays a partially snow-covered cavity in a ground ice massif. The depth of the cavity from the crater parapet is at least 28.5 m, the diameter of the crater neck is about 13 m. In the lower part, the cavity widens to 26 m and additionally extends by at least 8 m in the NNW direction at an azimuth of about 341°, which is consistent with the direction of the faults of the Bovanenkovo field identified by seismic exploration data. The bottom of the cavity has an elliptical shape with the size from 26×33 m to 26×41 m. The study is interdisciplinary and is included in the list of critical technologies for the prevention and reduction of risks of natural and man-made emergencies.

Keywords: Arctic, Yamal peninsula, Bovanenkovo field, permafrost (PF), 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 the Earth in a changing climate" (No. 122022800264-9).

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the management of Gazprom Dobycha Nadym LLC, which provided great support to the expeditionary research of the OGRI RAS on the basis of the Agreement on Scientific and Technical Cooperation.

The authors are grateful to the chief engineer — first deputy general director of Gazprom Dobycha Nadym LLC V. N. Polozov, and the deputy head of the Engineering and Technical Center of Gazprom Dobycha Nadym LLC A. B. Osokin for useful discussions of the research results.

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 RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: geo.ecology17@gmail.com.

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

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