DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-4-17
УДК 502.171, 504.4, 504.7, 553.981.2

АНОМАЛЬНЫЙ БЫСТРЫЙ РОСТ И ВЗРЫВ ЯМАЛЬСКОГО БУГРА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПУЧЕНИЯ С23 В 2020—2024 ГОДАХ

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

Статья поступила в редакцию 7 июля 2025 г.

Для цитирования
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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-4-17.

В ходе экспедиций «Ямал-2024» впервые исследован объект С23 катастрофического взрыва газа 30 августа 2024 г. на Ямале в районе Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения на склоне морской террасы. На основе фотограмметрической обработки 463 аэрофотоснимков БПЛА построены 3D-модель и цифровые двойники объекта С23, в том числе в виртуальной реальности, управляемой искусственным интеллектом. Мониторинговые исследования 2011—2024 гг. с применением данных дистанционного зондирования Земли (ArcticDEM и БПЛА) позволили установить аномально высокую среднюю скорость роста бугра пучения — около 40 см/год за четыре года до его взрыва, которая в совокупности с ранее полученными подобными данными на объектах С11, С17 и С22 может служить основным критерием выявления взрывоопасных бугров пучения. Подтвержден эндогенный газодинамический механизм роста бугра пучения с последующим мощным выбросом, самовоспламенением и взрывом газа с образованием кратера в своде полости. Результаты позволяют снизить угрозы возникновения аварийных и катастрофических ситуаций на объектах нефтегазового комплекса в Арктике.

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

Начиная с 2014 г. мировое научное сообщество заинтересовано исследованиями уникального явления образования гигантских кратеров на севере Западной Сибири [1—13]. В результате 11-летних исследований взрывной дегазации Земли на севере Западной Сибири с образованием более 20 кратеров в Институте проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН накоплен большой объем разнообразных данных о подобных событиях в различных регионах мира, сосредоточенных в созданной и постоянно развиваемой геоинформационной системе «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО») [1—5]. Комплексный анализ имеющихся данных позволил подтвердить впервые сформулированный [1] газодинамический генезис формирования многолетних бугров пучения (МБП) в кровле газонасыщенных термокарстовых полостей, образующихся в массивах подземного льда под действием эндогенных и экзогенных факторов [3; 4]. При этом возникновение сверхлитостатических давлений газа в этих полостях приводит не только к формированию МБП, но и к их пневматическим взрывам с появлением гигантских кратеров с брустверами выброшенной породы. Разлет выброшенных кусков мерзлой породы и ледогрунта достигает нескольких сотен метров. Кроме того, во всех пяти случаях выбросов газа из разорвавшихся МБП (С3, С9, С11, С21 и С23 в ГИС «АМО»), наблюдавшихся коренным населением, подтверждаются самовоспламенения и взрывы газа, что делает данное явление крайне опасным [14—16]. В результате проведенных исследований впервые установлены

© Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А., Гаврилов А. А., 2025

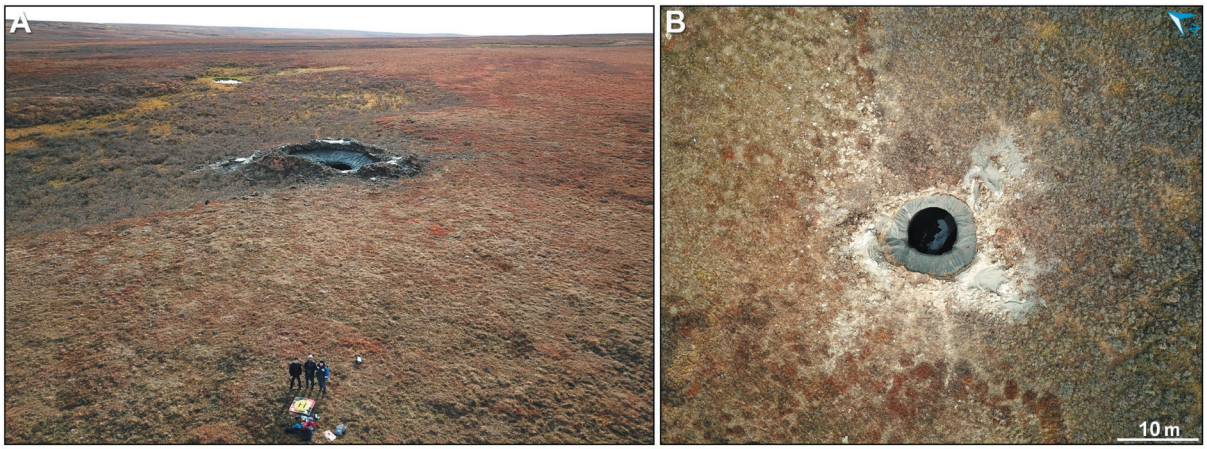

Рис. 1. Аэрофотоснимки кратера С23 с БПЛА: панорамный (А) и в надир (В) (И. В. Богоявленский, 17 сентября 2024 г.)
Fig. 1. Aerial images of the C23 crater from the UAV: panoramic (A) and at nadir (B) (I. V. Bogoyavlensky, September 17, 2024)

закономерности формирования опасных газонасыщенных объектов в криолитосфере Земли [17, с. 788], позволяющие снизить риски возникновения аварийных и катастрофических ситуаций на объектах нефтегазового комплекса в Арктике.

Бóльшая часть зафиксированных взрывов произошла в районе расположенного в 40 км от западного побережья полуострова Ямал Бованенковского нефегазоконденсатного месторождения (НГКМ) [18; 19], открытого в 1971 г. и разрабатываемого в промышленных масштабах ООО «Газпром добыча Надым» ПАО «Газпром» с 23 октября 2012 г. Это самое крупное на Ямале месторождение (площадь лицензионного участка около 1400 км^2) обладает уникальными начальными запасами газа в размере 4,9 трлн м^3 и входит в десятку крупнейших газовых месторождений мира. В 2021 г. добыча газа на Бованенковском НГКМ достигла 110,8 млрд м^3/год, а проектный уровень добычи — 115 млрд м^3/год. Вблизи от Бованенковского НГКМ расположены два других уникальных месторождения — Крузенштернское и Харасавэйское, которые ООО «Газпром добыча Надым» готовит к началу эксплуатации. Суммарные начальные запасы газа трех месторождений — около 9 трлн м^3. Район расположения этих месторождений является зоной активного оленеводства, при этом пути каслания (перемещения оленьих стад) во многих местах пересекаются с инфраструктурой месторождений, включая трубопроводы, автодороги и железную дорогу Обская — Карская [20].

30 августа 2024 г. представитель коренного населения оленевод Майма Худи услышал взрыв и увидел «пламя в форме гриба, которое видно было на расстоянии 30 км»[1]. 9 сентября он побывал около кратера, обнаруженного вблизи южной границы Бованенковского НГКМ, и выложил в социальных сетях его первые изображения. Авторы незамедлительно подключились к изучению нового объекта, получившего в ГИС «АМО» индекс С23, и уже 17 сентября выполнили его обследование в рамках экспедиций «Ямал-2024», проведенных ИПНГ РАН при логистической поддержке ООО «Газпром добыча Надым». На рис. 1 приведены рекогносцировочные аэрофотоснимки Ямальского объекта выброса газа С23 с беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

Основной целью исследований в данной работе является комплексное изучение причин и последствий катастрофического выброса газа на Ямальском объекте С23, мониторинг его развития на основе построения трехмерных и четырехмерных (3D и 4D) моделей до и после взрыва по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и с БПЛА.

Методы дистанционных исследований

Для исследований целевых объектов авторы используют широкий комплекс данных ДЗЗ из космоса. Общедоступные космоснимки среднего разрешения (например, Sentinel и Landsat) позволяют определить временной интервал возникновения чрезвычайного события, включая выбросы газа с образованием кратеров. Космоснимки высокого разрешения (например, WorldView (WV), GeoEye (GE), QuickBird (QB), PlanetScope (PS), Ресурс-П, Канопус-В) позволяют проводить детальный анализ произошедших событий [2—5; 14—16].

Большую пользу в мониторинговых исследованиях поверхности Земли приносят цифровые модели рельефа (ЦМР) ArcticDEM, созданные в Полярном геопространственном центре PGC (Polar Geospatial Center) Университета Миннесоты при фотограмметрической обработке космоснимков высокого разрешения [2—5; 14—16; 21; 22]. При обработке космоснимков субметрового разрешения (0,32—0,5 м) WV-1, WV-2, WV-3 и GE-1 создаются высококаче-

[1] «Было пламя в форме гриба»: на Ямале обнаружили аномальную воронку. — URL: https://hantimansiysk.bezformata.com/listnews/yamale-obnaruzhili-anomalnuyu-voronku/136292295/.

ственные ЦМР ArcticDEM с разрешением 2 м [21; 22]. Особенности использования ArcticDEM при изучении ряда объектов выбросов газа на Ямале (С1, С2, С11, С15, С17, С22 и др.) описаны в [2; 5; 14—16].

Особенно важные результаты при изучении локальных объектов, включая МБП и кратеры, получаются с применением аэрофотоснимков с БПЛА [2; 14—16]. В качестве БПЛА хорошо зарекомендовал себя квадрокоптер DJI Mavic Pro (DJI, Китай) с камерой Ultra HD «Mavic Pro» высокого разрешения (12,35 Мп) со стабилизатором [23]. Привязка БПЛА осуществляется по навигационным системам GPS и ГЛОНАСС. ДЗЗ с БПЛА позволяет не только сохранять и анализировать цифровые аэрофотоснимки изучаемых объектов в высоком разрешении, но и строить с высокой детальностью разновременные 3D-модели, по которым возможен мониторинг развития изучаемых объектов (4D-моделирование). С этой целью выполняется цифровая фотограмметрическая обработка аэрофотоснимков с применением программного обеспечения (ПО) Agisoft Metashape Professional (Agisoft LLC, ГК «Геоскан», Россия) [24], позволяющего, по мнению авторов, достигать лучших результатов, чем Pix4Dmapper (Pix4D SA, Швейцария) [25]. Картографические изображения, графические построения 3D/4D-моделей, сохранение и развитие базы данных (Big Data) осуществляются с применением ПО геоинформационной системы ArcGIS (ESRI, США) [26].

Отображение 3D-модели кратеров и подземных полостей в виде физической модели выполняется на основе аддитивной технологии из пластика на 3D-принтере Flying Bear Ghost 5 (Китай, https://lider-3d.ru/blog/obzory/obzor-3d-printera-flyingbear-g/). Построение цифрового двойника объекта в виртуальной реальности проводится с применением ПО Unity (Unity Technologies, США, https://unity.com/ru). Анализ изображений 3D-моделей труднодоступных объектов в виртуальной реальности, управляемой искусственным интеллектом, предоставляет принципиально новые возможности познания их специфики.

Краткое геолого-географическое и геокриологическое описание района работ

Полуостров Ямал характеризуется сплошным распространением многолетнемерзлых пород (ММП), толща которых в районе Бованенковского НГКМ изучена по данным бурения более 70 мерзлотно-параметрических скважин ООО НТФ «Криос» по заказу ОАО «Газпром» (ныне – ПАО «Газпром») и многочисленных нефтегазопоисковых и разведочных скважин [16; 18; 27—31]. Мощность ММП в основном составляет до 140—300 м, в центральной части Ямала — до 400—500 м, а на поймах крупных рек — от 0 до 150 м [32]. В районе работ расположена долина реки Мордыяха (ранее Муртыяха), впадающей в пролив Мутный Шар Карского моря.

В районе Бованенковского НГКМ широко распространены массивы подземного льда, преимущественно расположенные в возвышенных частях рельефа местности в пределах третьей морской террасы [27—29]. Морские террасы сложены четвертичными породами казанцевской и салехардской свит песчано-глинистого состава с включениями залежей пластового льда, перекрытых комплексом склоновых делювиально-солифлюкционных отложений [16; 19; 27—29]. Крупные залежи льда мощностью не менее 15—20 м обнаружены «в средне- и верхнеплейстоценовых морских и ледниково-морских отложениях суглинисто-глинистого состава» [28]. На Харасавэйском и Арктическом месторождениях при бурении трех скважин вскрыты пластовые залежи льда мощностью до 60 м, залегающие на песчаных пластах большой мощности [28, с. 23]. По данным специалистов ООО «Газпром ВНИИГАЗ», в криолитозоне практически повсеместно существуют газогидраты, в том числе реликтовые (метастабильные) в приповерхностных ММП [30—32].

На дне непромерзающих до дна термокарстовых озер существуют талики, которые при больших размерах озер могут быть сквозными через всю толщу ММП. Наличие таликов создает благоприятные условия для интенсивной субвертикальной миграции и выбросов газа в гидро- и атмосферу, проявления которых обнаружены нами на полуострове Ямал по данным ДЗЗ в 4951 зоне на дне 3581 термокарстового озера с кратерами выбросов газа [33]. Кроме того, подобные явления в больших масштабах наблюдаются со дна рек и мелководных частей морей Арктики, при этом только в прибрежных частях Карского моря (включая Обскую и Тазовскую губы) выявлено 1612 зон интенсивной дегазации Земли [33]. Столь широкомасштабные очаги дегазации Земли, видимо, имеют связь не только с субвертикальной миграцией глубинного газа по проницаемым разломам, но и с диссоциацией газогидратов в процессе развития таликов.

Результаты аэрокосмических исследований объекта С23

Анализ района исследований

Кратер С23 (70,1970° N, 68,4976° E) образовался в 6,8 км южнее лицензионного участка Бованенковского НГКМ ООО «Газпром добыча Надым» (ПАО «Газпром»), в 13,2 км южнее аэропорта Бованенково, в 19,1 км западнее железной дороги и в 11,4 км восточнее магистрального газопровода высокого давления «Бованенково — Ухта» (рис. 2). Район исследований характеризуется чередованием возвышенностей морских террас и низменных частей с речной и озерной системами (см. рис. 1 и 2).

Анализ информации в ГИС «АМО» позволил установить, что объект выброса и взрыва газа С23 расположен в 3,8 км западнее реки Мордыяха и находится в 5,6 км к северу от Дуплетного объекта С22 (70,1461° N, 68,5002° E) (см. рис. 2А), взорвавшего-

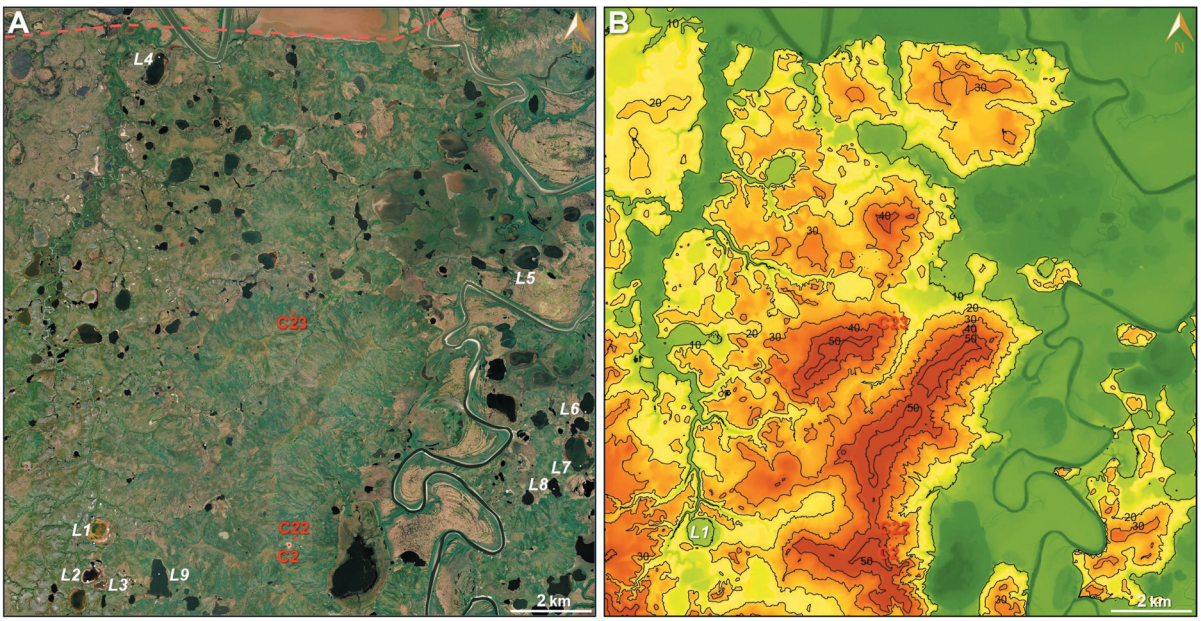

Рис. 2. Район исследований кратера С23 на основе космоснимка WV-2 23 июля 2023 г. (база данных ESRI) (A) и ЦМР ArcticDEM по данным WV-1 1 июня 2023 г. (B). Обозначения: С2, С22 и С23 — объекты взрывов газа; L1, ..., L7 — термокарстовые озера с признаками дегазации в виде кратеров на дне (L1–L5) и неоднородностей во льду (L7–L9); розовый пунктир — южная граница Бованенковского лицензионного участка

Fig. 2. Study area of the C23 crater based on the WV-2 satellite image of July 23, 2023 (ESRI database) (A) and the ArcticDEM based on WV-1 data of June 1, 2023 (B). Designations: C2, C22 and C23 are gas explosion objects; L1, ..., L7 are thermokarst lakes with signs of degassing in the form of craters at the bottom (L1–L5) and heterogeneities in the ice (L7–L9); the pink dotted line is the southern boundary of the Bovanenkovo Field license area

ся в 2023 г. и исследованного нами в экспедициях «Ямал-2024» (май и сентябрь 2024 г.) [16]. Уникальность объекта С22 заключается в его расположении всего в 230 м от объекта самого мощного выброса газа С2 (70,1445° N, 68,4964° E) в 2012 г., в связи с чем объект С22 получил название Дуплетный [16]. В 7 км юго-западнее объекта С23 расположено Кратерное озеро (см. рис. 2, L1), на котором ранее нами были выявлены различные газопроявления, включая остатки бруствера выброшенной взрывом породы [34, с. 9].

Комплексный анализ космоснимка WV-2 23 июля 2023 г. и ЦМР ArcticDEM, построенной при обработке космоснимков WV-1 1 июня 2023 г. (см. рис. 2), позволяет сделать вывод о практически идентичных условиях образования объектов С2, С22 и С23 на восточных склонах морской террасы (см. рис. 2B).

Обработка данных аэрофотосъемки с БПЛА

Аэрофотосъемка объекта С23 была проведена 17 сентября 2024 г. В связи с ограниченным временем пребывания рядом с кратером и порывистым ветром (несмотря на ясную без осадков погоду) было принято решение провести съемку кратера и прилегающей к нему территории не в автоматическом, а в ручном режиме. Общая площадь отснятой территории вокруг кратера С23 составила около 15 тыс. м^2 (1,5 га). На высотах полета БПЛА около 50 м выше поверхности земли и внутри обнажившейся при взрыве полости в массиве подземного льда до 7 м ниже бруствера кратера было сделано и в дальнейшем использовано при обработке 463 кондиционных аэрофотоснимка, примеры которых приведены на рис. 3. При этом внутри полости сделано 108 аэрофотоснимков (23,3%).

Аэрофотоснимки ниже уровня земли (см. рис. 3D, 3E, 3F) позволили получить качественные изображения всех частей полости, включая два боковых грота, расположенные в диаметрально противоположных направлениях в западной (E) и восточной (F) частях полости. Несмотря на малый диаметр горловины кратера (около 6 м), дно полости за счет его небольшой глубины достаточно хорошо освещено солнечным светом, что позволяет отчетливо видеть его частичное заполнение водой и упавшим грунтом даже при полете БПЛА выше поверхности земли (см. рис. 1B и рис. 3D, 3E, 3F).

На основе комплексной фотограмметрической обработки 463 аэрофотоснимков с БПЛА, многократно перекрывающих район исследований, в ПО Agisoft Metashape [24] были построены ортофотоплан и 3D ЦМР поверхности земли, кратера и полости, приведенные на рис. 4. Рассчитанная ЦМР позволила создать физическую модель из пластика на 3D-принтере Flying Bear Ghost 5, представленную в различных ракурсах на рис. 5. По цифровой 3D-модели объекта С23 было определено, что максимальная глубина поверхности воды на дне полости от уровня бруствера в западной части составила около 14,7 м, а в восточной части — 14,4 м. За счет

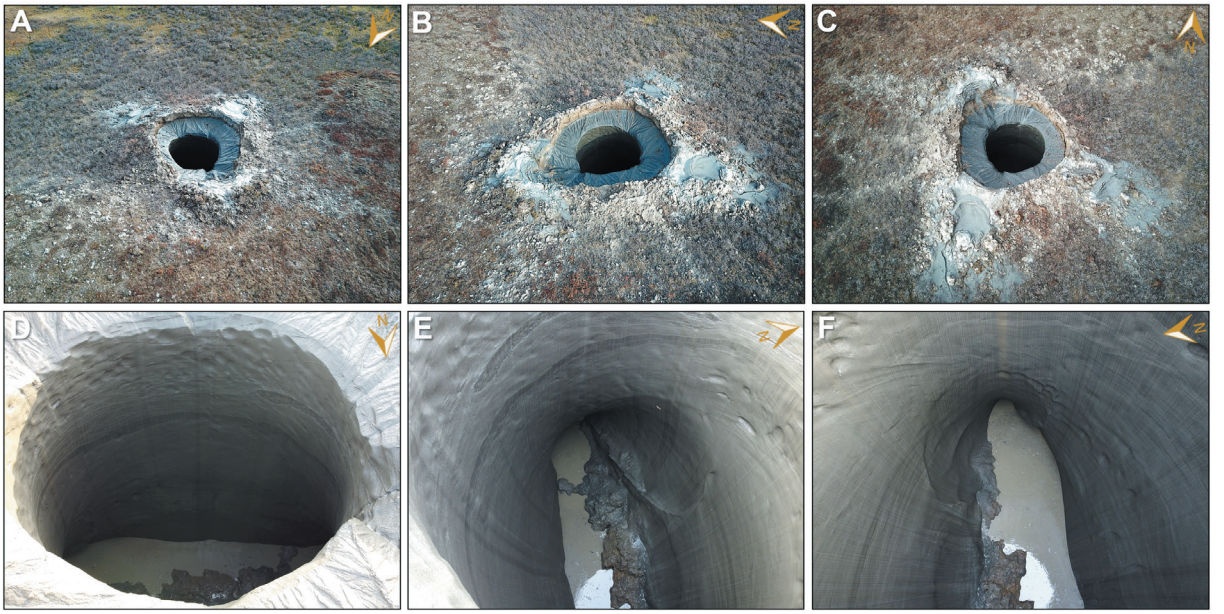

Рис. 3. Аэрофотоснимки кратера С23 с высоты полета БПЛА 50 м (A, B, C) и ниже уровня земли в полости (D, E, F) (И. В. Богоявленский, 17 сентября 2024 г.)
Fig. 3. Aerial images of the C23 crater from the UAV at flight altitude of 50 m (A, B, C) and below ground level in the cavity (D, E, F) (I. V. Bogoyavlensky, September 17, 2024)

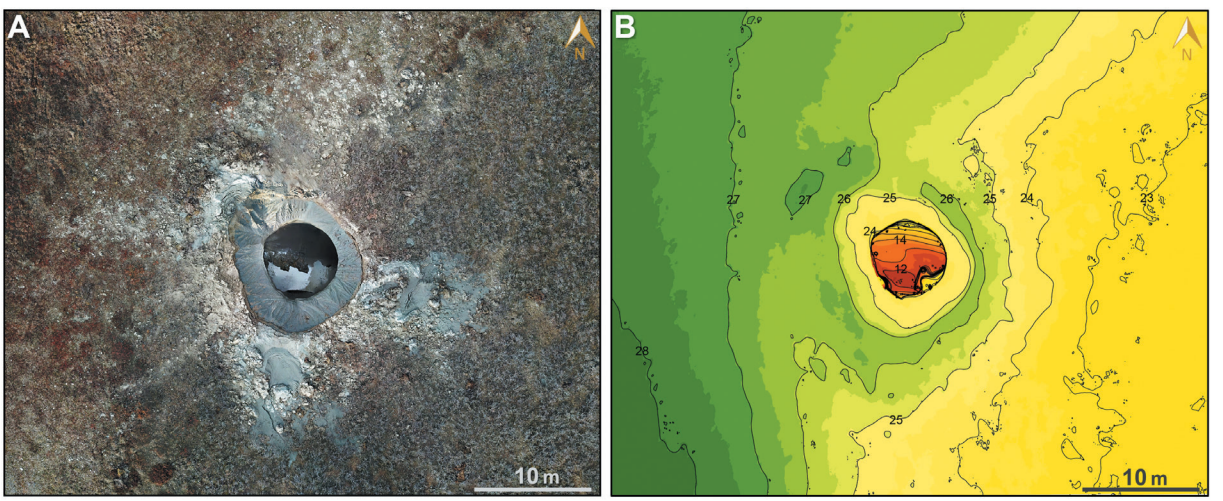

Рис. 4. Ортофотоплан (A) и ЦМР (B) района кратера С23, построенные по данным БПЛА
Fig. 4. Orthophotoplan (A) and DEM (B) of the C23 crater area, based on UAV data

частичного заполнения дна водой предполагается, что первоначальная глубина грунта на дне полости была около 16 м от поверхности земли.

Размеры верхней кромки бруствера кратера меняются от 11,4 до 13,2 м (максимальный в северо-западном направлении). Горловина кратера расположена в массиве льда на глубине 1,6—1,9 м от бруствера и в 12,8 м от уровня воды на дне полости, а ее диаметр меняется от 6,42 до 6,76 м (в среднем 6,57 м). Взрыву с образованием кратера подверглась лишь сводовая часть МБП С23, в связи с чем диаметр горловины полости меньше ее нижерасположенных размеров. Особый интерес представляет дно полости на уровне воды, имеющее форму сильно сжатого эллипса размером 3,3×16,9 м (коэффициент сжатия 0,1953) с ориентацией большой/главной оси в субширотном направлении.

В дополнение к цифровой и физической 3D-моделям объекта С23 в ПО Unity был сформирован его цифровой двойник в виртуальной реальности, который позволяет с применением специального оборудования с программно-алгоритмическим обеспечением искусственного интеллекта погружаться в эту модель для изучения любой части объекта. В итоге формирования цифрового двойника объекта С23 в виртуальной реальности на рис. 6

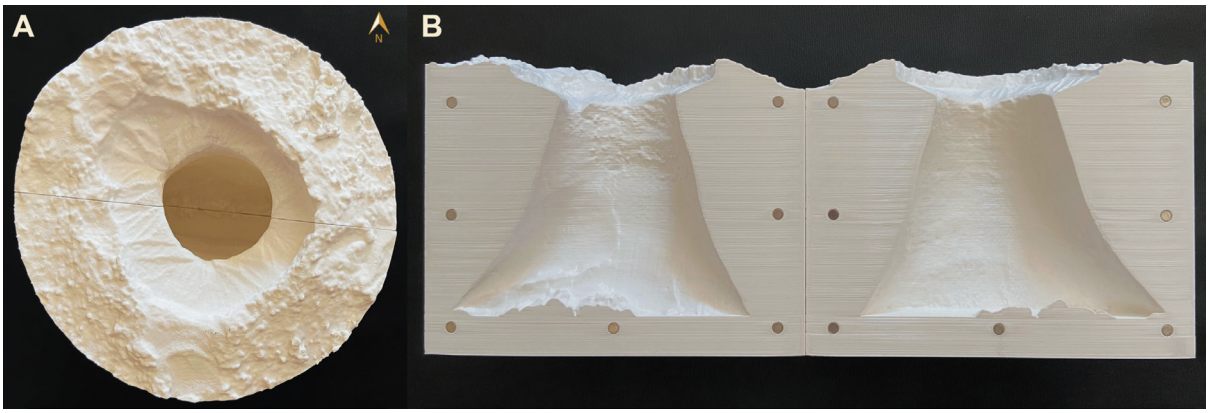

Рис. 5. Физическая 3D-модель полости в массиве подземного льда и кратера выброса газа объекта С23: виды сверху (A) и в разрезе (B)
Fig. 5. Physical 3D model of a cavity in the ground ice massif and gas blowout crater of the C23 object: views from above (A) and in section (B)

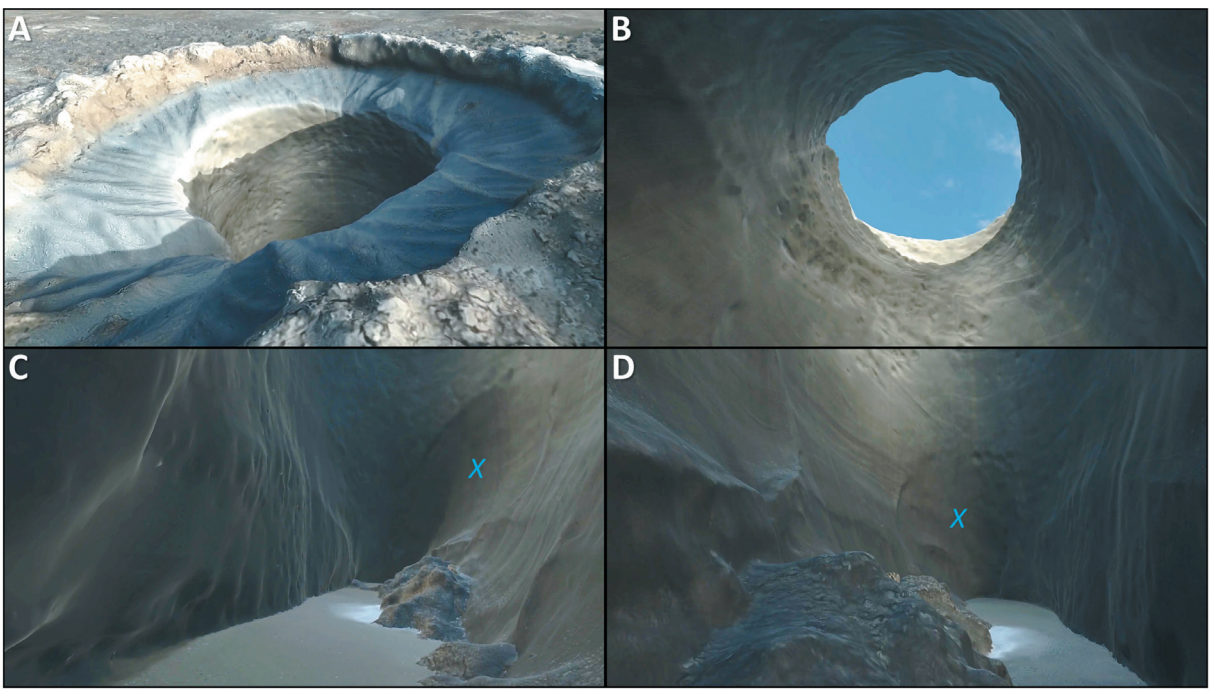

Рис. 6. Изображения объекта выброса газа С23 в виртуальной реальности: виды с поверхности земли (A) и дна полости (B, C, D), в том числе на западный (C) и восточный (D) гроты
Fig. 6. Virtual reality images of the C23 gas blowout site: views from the ground surface (A) and the cavity floor (B, C, D), including the western (C) and eastern (D) grottoes

приведен ряд его виртуальных изображений с поверхности (A) и дна полости (B, C, D).

Мониторинг развития объекта С23 в 2011—2024 гг.

Мониторинг развития объекта С23 проводился на основе комплексной обработки и анализа данных ДЗЗ из космоса и с БПЛА. Согласно базе данных ArcticDEM [21; 22], для района исследований объекта С23 доступно 7 разновременных полос ЦМР (стрипов) за продолжительный 12-летний период изменений обстановки в 2011—2023 гг. ЦМР ArcticDEM были построены по зимне-весенним (май-июнь) и летне-осенним (июль-сентябрь) космоснимкам WV-1, WV-2 и WV-3, включая 11 сентября 2011 г., 21 июля 2013 г., 16 июня 2016 г., 27 июня 2017 г., 18 мая 2019 г., 27 мая 2020 г., 1 июня 2023 г. Фрагменты этих ЦМР для участка объекта С23 размером 33×33 м приведены на рис. 7. Предварительно данные ЦМР были подвергнуты взаимной пространственной увязке для устранения погрешностей, как отмечалось выше и в [2; 15; 16].

Несмотря на явное наличие снежного покрова на космоснимках 18 мая 2019 г. и 27 мая 2020 г., искажающего (сглаживающего) рельеф, на всех ЦМР 2011—2020 гг. виден пологий склон морской террасы в восточном направлении, на котором присут-

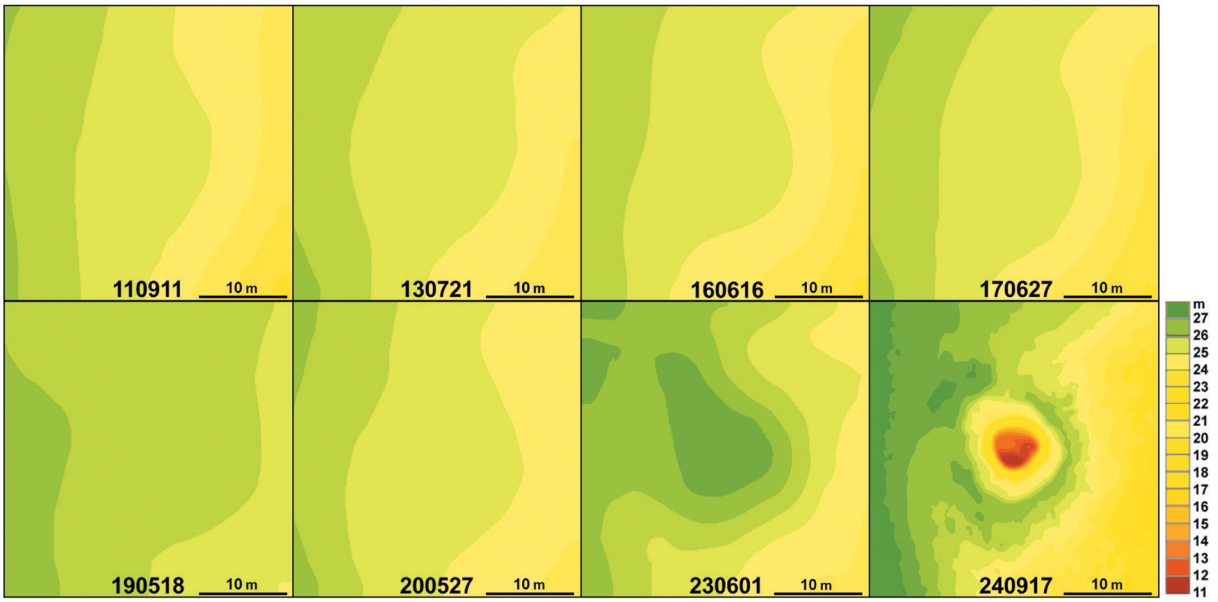

Рис. 7. ЦМР ArcticDEM объекта С23 за период 2011—2023 гг. и БПЛА 2024 г.
Fig. 7. DEMs from ArcticDEM for the C23 object for the period 2011—2023 and from the UAV in 2024

ствует слабовыраженный структурный нос. На ЦМР 1 июня 2023 г. видно, что на его месте всего за три года сформировался четко выраженный бугор пучения высотой около 1,5 м, при этом среднегодовой прирост МБП составил около 50 см.

На рис. 7 отсутствие данных ArcticDEM после взрыва МБП С23 30 августа 2014 г. компенсировано 3D ЦМР, построенной при фотограмметрической обработке избранных 220 аэрофотоснимков при высоте полета БПЛА около 50 м 17 сентября 2024 г., что является примерным отображением потенциальной 3D модели при ДЗЗ из космоса (см. рис. 4В).

В связи с расположением МБП С23 на склоне морской террасы приведенные выше характеристики роста МБП в 2020—2023 гг. приблизительны. Более детальный и точный анализ изменений размеров МБП возможен при устранении влияния моноклинальной составляющей ЦМР, что требует ее синтезирования на время «Х» до появления структурного носа, аналогично выполненным ранее для объектов С1, С2, С11, С15, С17, С22 и др. [2; 5; 14—16]. С этой целью была проведена коррекция исходной ЦМР за 2011 г. путем интерполяции исходных изолиний с игнорированием их небольшой ундуляции на месте слабовыраженного структурного носа (см. рис. 7). На следующем этапе скорректированная ЦМР «Х» вычиталась из каждой разновременной ЦМР (см. рис. 7), при этом были получены разностные разновременные массивы ЦМР (4D-модели), представленные на рис. 8 с интервалом цветовой кодировки аномальных изменений района объекта С23 через 0,2 м (легенда приведена через 0,5 м).

Обсуждение результатов

Комплексный анализ разностных ЦМР за период 2011—2024 гг. (см. рис. 8) позволяет сделать следующие выводы. В 2011—2020 гг. слабовыраженный структурный нос (см. рис. 7) обусловлен наличием малоамплитудного поднятия (до 0,2 м) без признаков его роста (наблюдается 11 сентября 2011 г., 16 июня 2016 г. и 27 июня 2017 г.). Отсутствие подобного объекта на трех других разностных ЦМР, видимо, обусловлено искажениями рельефа за счет бурной растительности 21 июля 2013 г. и остаточного снега толщиной до 0,8—1,4 м в восточной пониженной зоне участка исследований 18 мая 2019 г. (до 1,4 м) и 27 мая 2020 г. (до 0,8 м).

В 2020—2023 гг. произошел аномально быстрый рост бугра пучения С23 примерно на 1,3 м или в среднем на 43 см в год, при этом размер основания бугра достиг 21,4×28,6 м (см. рис. 8 — 230601-Х). Сопоставление МБП 2023 г. с его остаточными частями после взрыва в 2024 г. позволяет предположить, что за последний год бугор еще вырос примерно на 40 см и достиг высоты 1,7 м. Видимый размер основания МБП после взрыва уменьшился до 19,5×25 м (на 8,9—12,6%), что, вероятно, обусловлено небольшим проседанием поднятия после сброса давления газа.

Необходимо отметить, что тренд активного роста МБП за 3—4 года до их взрывов также наблюдался на трех детально исследованных ранее объектах С11, С17 и С22 [2; 5; 16]. В частности, средняя скорость роста МБП С22 в 2020—2023 гг. составляла 44 см в год [16]. Как мы отмечали ранее [16], высокая скорость роста порядка 40—44 см/год не характерна для МБП криогенного типа (закрытая система). По данным общепризнанного эксперта J. R. Mackay,

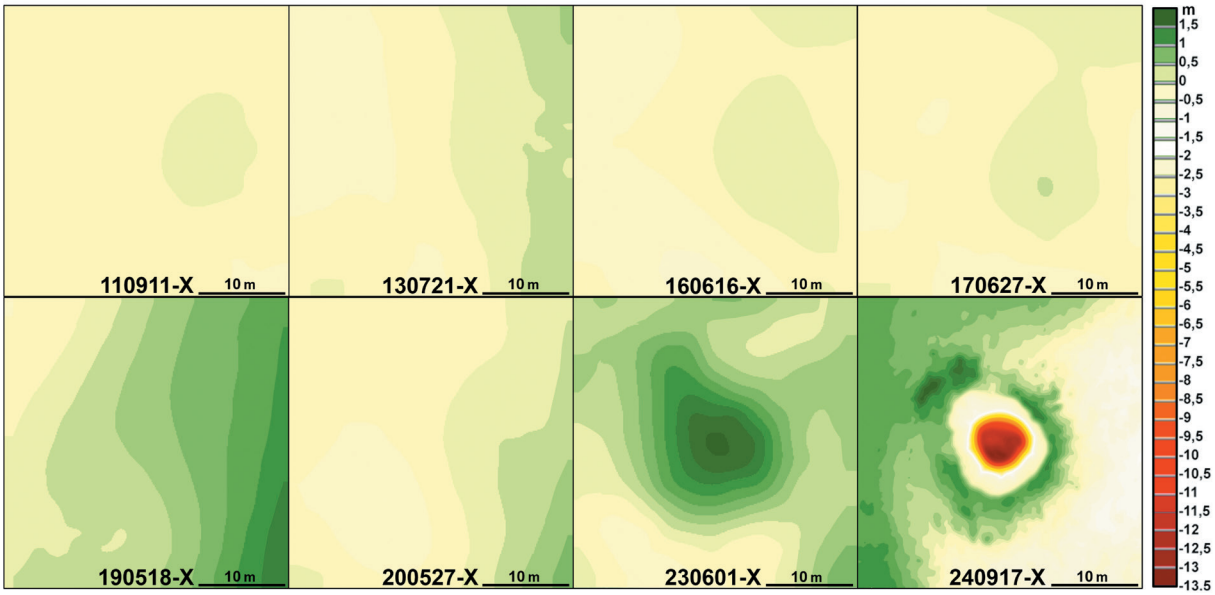

Рис. 8. Разностные ЦМР объекта С23 на основе ArcticDEM за период 2011—2023 гг. и БПЛА 2024 г.
Fig. 8. Differential DEMs for the C23 object based on ArcticDEM for the period 2011—2023 and from the UAV in 2024

для классических МБП (pingo-булгунняхи) в Канаде преимущественно были зафиксированы скорости роста от 1 до 15 см/год [35; 36], при этом для одного из крупнейших МБП Ibyuk Pingo — до 2,3 см/год [35]. Таким образом, аномально высокая средняя скорость роста МБП около 40 см/год за 3—4 года до его взрыва является закономерностью и может служить основным критерием выявления взрывоопасных бугров газодинамического пучения.

В ходе всех проведенных в 2014—2025 гг. исследований на основе данных ДЗЗ из космоса и с БПЛА доказано, что до выбросов и взрывов газа на месте кратеров существовали МБП [1—5; 14—16; 38]. Всего по данным ДЗЗ только на одном Ямале по состоянию на 2021 г. авторами было обнаружено 7300 бугров пучения [2]. Классические МБП криогенного генезиса обычно формируются в низменных частях в котловинах высохших озер (хасыреи) или в речных долинах [1—16; 28; 29; 33—36]. Однако геоморфологические особенности расположения МБП, на месте которых образовались кратеры выбросов газа, в основном оказались другими — это возвышенности и склоны морских террас, что может служить одним из основных поисковых признаков потенциально взрывоопасных МБП. Исключение составляют образовавшиеся в речных долинах Сеяхинский (С11) и Еркутинский (С12) МБП. При этом на Сеяхинском объекте С11 [5; 38] на основе георадиолокационной съемки доказано существование массива подземного льда, а не ледяного ядра [5]. Существование массива подземного льда также доказано по данным электроразведки [9; 10] и бурения на широко известном первом Ямальском объекте С1, результаты изучения которого приведены в [1; 6—10; 14].

Выбросы газа 2012—2024 гг. из полостей С2, С22 и С23 в массивах подземного льда единой крупной морской террасы, показанной на рис. 2, а также обнаруженные обнажения льда [16] позволяют предполагать существование единого крупного массива подземного льда размером до 1,5×7,5 км (около 10 км^2) сложной конфигурации.

Единственным обоснованием эллиптической формы дна полости объекта С23 является его приуроченность к субвертикальному флюидопроницаемому разлому, на участке которого происходили миграция газонасыщенных флюидов и локальное вытаивание подземного льда с формированием газонасыщенной полости. В связи с тем, что главная ось эллипса дна исследованной полости объекта С23 ориентирована в субширотном направлении (азимут около 276°), можно считать, что разлом имеет аналогичную ориентацию. Субширотная ориентация разлома на объекте выброса газа С23 зафиксирована нами впервые, на других исследованных объектах она была близка к субмеридиональной (С17 — 350°, С22 — 341°). Такая ситуация не должна удивлять, так как на Бованенковском, Нейтинском и Новопортовском НГКМ доказано существование разно ориентированных систем разломов [18]. Также отмечено, что «большинство русел не только крупных, но и средних и малых рек приурочены к геологическим проявлениям разломов» [18, с. 74], при этом они часто меняют ориентацию, что видно на примере реки Мордыяха (см. рис. 2). Непосредственно Бованенковское НГКМ приурочено к крупной локальной структуре, нарушенной разломами субмеридиональной и субширотной ориентаций [18, с. 92].

Полевые наблюдения и дешифрирование аэрофотоснимков с БПЛА позволили зафиксировать раз-

лет большей части крупных кусков мерзлого грунта и льда на удаления от центра кратера до 30 м и небольших кусков примерно до 100 м (возможно, и дальше), что соизмеримо с Мордыяхским объектом выброса газа С15 в 2017 г. [15], но меньше, чем на многих других объектах (С1, С2).

Причину возникновения пламени на объекте выброса газа С23, наблюдавшегося М. Худи с расстояния 30 км, можно объяснить самовоспламенением газа, которое ранее также было зафиксировано коренным населением при взрывах МБП С3, С9, С11 и С21 [3; 4; 16]. В предыдущих работах мы отмечали, что основной причиной самовоспламенений и взрывов газа при его мощных природных и техногенных выбросах, включая сильные извержения грязевых вулканов и аварийные выбросы газа при бурении скважин, являются электризация окружающего пространства и электростатические разряды, возникающие при фонтанировании струи газа с неоднородными частицами в воздушной среде и/или выходе газа через водную толщу [3; 4]. Этот вывод подтверждается многими данными, включая [37; 38]. Очевидно, что самовоспламенения и взрывы газа значительно увеличивают силу первоначально пневматического взрыва и разброс кусков мерзлой породы и ледогрунта.

Многочисленные небольшие плоские углубления/каверны в стенках полости объекта С23, хорошо видимые на рис. 3 и 6, аналогичны для всех ранее обследованных подобных объектов [2; 4; 16]. Их формирование обусловлено неравномерным таянием (плавлением) льда в газовом пространстве, существовавшем до взрыва, что ранее было обосновано в работе [4, с. 59]. Особый интерес вызывают две крупные каверны в северной части полости в западном и восточном гротах, отмеченные на рис. 6C и 6D голубыми крестами. По нашему мнению, они сформировались в результате плавления льда под направленным действием струй газа положительной температуры (подмерзлотный газ), выходящего по разлому из угловых частей полости. Эти каверны также хорошо видны на аэрофотоснимках (см. рис. 3E и 3F) и на физической модели (см. рис. 5B).

17 сентября 2024 г. со дна полости С23 была взята проба воды, химический состав которой проанализирован в Лаборатории химического анализа процессов коррозии Службы мониторинга коррозии технологического оборудования Инженерно-технического центра филиала ООО «Газпром добыча Надым». Согласно протоколу испытаний ПР-ТП-811-2024 от 21 сентября 2024 г., в воде выявлено наличие соли (0,714 г/дм^3 — между слабоминерализованной и солоноватой). При этом по катионно-анионному составу вода является хлоридно-натриевой, что типично для криопэгов исследуемого региона, тогда как воды сезонно-талого слоя являются пресными и характеризуются гидрокарбонатно-натриевым составом. Описанная ситуация позволяет считать воду из С23 смесью подземных соленых вод (криопэгов) и талых вод сезонно-талого слоя, а также вод с оттаивающих ледяных стенок полости и упавшего на дно почвенного грунта. Анализ летних космоснимков Sentinel 2025 г. показал значительное расширение площади кратера С23 и его заполнение водой.

Ближайшая к кратеру С23 разведочная скважина Бованенковская-73 (70,260° N, 68,345° E; забой 2202 м в нижнем мелу) была пробурена Производственным объединением «Ямалнефтегазгеология» «Главтюменьгеологии» в период с 21 декабря 1979 г. по 6 февраля 1980 г. С учетом того, что данная скважина расположена достаточно далеко (в 9,1 км к северо-западу от С23) и не вскрыла углеводороды, можно считать крайне маловероятным техногенный субгоризонтальный переток газа в район объекта выброса газа С23. Таким образом, наиболее вероятно, что выброс газа на объекте С23 имеет природный генезис, как и у других подобных объектов. Газ в полости С23 накапливался за счет миграции в свободном и/или водорастворенном состояниях из глубинных и мелкозалегающих источников, включая диссоциацию криогенных газогидратов, а также благодаря привносу микробиального газа (*in situ*).

Необходимо отметить, что подобные мощные выбросы, самовоспламенения и взрывы газа в Арктике происходили еще до на начала нефтегазопоисковых работ на полуострове Ямал, о чем свидетельствуют представители коренного населения. В частности, М. Н. Окотэтто сообщил, что в районе озера Сэрто в 1950-х годах жители тундры наблюдали выброс и сильное многочасовое горение газа, которое, вероятно, было приурочено к небольшому озеру округлой формы, обнаруженному нами по данным ДЗЗ в условиях, подобных Дерябинскому кратеру С4 [1, 3; 39].

О том, что выбросы газа из толщи ММП происходили до начала активной фазы разработки месторождений углеводородов, свидетельствует наличие старых термокарстовых озер, в пределах которых при батиметрических исследованиях были зафиксированы локальные аномально глубокие участки конусообразной формы с углублением до 10—35 м относительно среднего уровня дна озерной котловины, в том числе на группе крупнейших озер Ямала Нейто-Ямбуто и Ярото Второе [27; 40]. Основным объяснением генезиса таких объектов служит то, что это подводные кратеры-покмарки выбросов газа, исследованиями которых на Тазовском полуострове более полувека назад занимались И. Л. Кузин и Н. М. Кругликов [41]. В настоящее время на полуострове Ямал таких озер обнаружено 3581, а на Тазовском полуострове — 102 [33, с. 165], при этом во многих из них продолжаются подводные выбросы газа, в том числе за счет диссоциации газогидратов [3; 4; 33].

Заключение

В ходе экспедиций «Ямал-2024» впервые исследован Ямальский объект С23 катастрофического выброса, самовоспламенения и взрыва газа с образованием кратера 30 августа 2024 г. в районе Бованенковского НГКМ на склоне морской террасы. На склонах этой же террасы южнее в 5,6—5,8 км в 2012 и 2023 гг. произошли подобные события на объектах С2 и С22. С высоким уровнем вероятности обосновано, что все эти выбросы газа имеют природный эндогенный генезис под действием газодинамического механизма [2—5; 14—16; 42, с. 133]. Выбросам газа предшествовало формирование газонасыщенных полостей в массивах подземного льда.

На основе фотограмметрической обработки 463 аэрофотоснимков БПЛА построены цифровой двойник Ямальского объекта С23 в виртуальной реальности и в виде физической модели на основе аддитивной технологии. Обосновано, что сильно вытянутая эллиптическая форма дна с коэффициентом сжатия 0,195 обусловлена просачиванием газа через разлом субширотной ориентации (азимут около 276°).

При мониторинговых исследованиях 2011—2024 гг. с применением ЦМР, построенных на основе данных ДЗЗ из космоса (ArcticDEM) и с БПЛА, была установлена аномально высокая средняя скорость роста бугра пучения около 40 см/год в четырехлетний период до его взрыва (2020—2024 гг.), которая в совокупности с ранее полученными подобными данными на объектах С11, С17 и С22 может служить основным критерием выявления взрывоопасных бугров пучения. Очевидно, что важным подспорьем при изучении динамики развития МБП может служить дифференциальный радарный интерферометрический мониторинг при ДЗЗ из космоса [43].

Результаты исследований относятся к приоритетным направлениям научно-технологического развития в части «Адаптация к изменениям климата, сохранение и рациональное использование природных ресурсов», способствуют повышению безопасности функционирования объектов нефтегазового комплекса в Арктике благодаря снижению угроз взрывных выбросов газа и входят в перечень критических технологий [44, п. 19 и 20].

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. 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 помощь в организации полевых работ и полезные рекомендации при обсуждении 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., 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).
3. *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).
4. *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).
5. *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.
6. *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—80.
7. *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).
8. *Лейбман М. О., Дворников Ю. А., Стрелецкая И. Д. и др.* Связь формирования воронок газового выброса с эмиссией метана на севере Западной Сибири // Актуальные проблемы нефти и газа. — 2018. — Вып. 4 (23).
Leibman M. O., Dvornikov Yu. A., Streletskaya I. D. et al. Relationship of gas emission funnels with methane emissions in the north of Siberia. Actual problems of oil and gas, 2018, iss. 4 (23). DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art60. (In Russian).
9. *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).
10. *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).
11. *Zolkos S., Fiske G., Windholz T. et al.* Detecting and Mapping Gas Emission Craters on the Yamal and Gydan Peninsulas, Western Siberia. Geosciences, 2021, vol. 11, iss. 1. Available at: https://doi.org/10.3390/geosciences11010021.
12. *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 Periglac Process, 2023, vol. 35, pp. 33—45. DOI: 10.1002/ppp.2211.
13. *Morgado A. M. O., Rocha L. A. M., Cartwright J. H. E., Cardoso S. S. S.* Osmos drives explosions and methane release in Siberian permafrost. Geophysical Research Letters, 2024, vol. 51, iss. 18, p. e2024GL108987. Available at: https://doi.org/10.1029/2024GL108987.
14. *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 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).
15. *Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А., Каргина Т. Н.* Мониторинг развития Мордыяхского 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, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 513—523. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-4-513-523. (In Russian).
16. *Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А.* Мониторинг развития Дуплетного объекта взрыва газа С22 на полуострове Ямал по данным дистанционного зондирования Земли // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 320—333.
Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Development monitoring of the C22 gas blowout Doublet object on Yamal peninsula using remote sensing data. Arctic: Ecology and Economy, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 320—333. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-320-333. (In Russian).
17. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. — М.: Минприроды России; МГУ им. М. В. Ломоносова, 2021. — 864 с.
On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020. State report. Moscow, Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2021, 864 p. (In Russian).
18. *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).
19. 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. 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).
20. *Головнев А. В., Лёзова С. В., Абрамов И. В. и др.* Этноэкспедиция на Ямале: ненецкие кочевья и газовые месторождения. — Екатеринбург: УрО РАН, «Изд. АМБ», 2014. — 232 с.
Golovnev A. V., Lezova S. V., Abramov I. V. et al. Ethno-expertise on Yamal: Nenets routs and gas fields.

Ekaterinburg, ABM Press, 2014, 232 p. Available at: https://ethnobs.ru/Ethnoexpertiza_na_Yamale.pdf. (In Russian).
21. *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.
22. *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.
23. Квадрокоптер DJI Mavic Pro Platinum. — URL: https://www.geo-spektr.ru/bespilotnye-letatelnye-apparaty/kvadrokoptery/dji/DJI-Mavic-Pro-Platinum.html.
Quadcopter DJI Mavic Pro Platinum. Available at: https://www.geo-spektr.ru/bespilotnye-letatelnye-apparaty/kvadrokoptery/dji/DJI-Mavic-Pro-Platinum.html. (In Russian).
24. 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.
25. Pix4Dmapper. The leading photogrammetry software for professional drone mapping. Available at: https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software/.
26. 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/ru-ru/arcgis/geospatial-platform/overview. (In Russian).
27. *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).
28. *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).
29. *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).
30. *Чувилин Е. М., Перлова Е. В., Баранов Ю. Б. и др.* Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. — М.: ГЕОС, 2007. — 137 с.
Chuvilin E. M., Perlova E. V., Baranov Yu. B. 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).
31. *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).
32. *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., Miklyaeva 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).
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. *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).
35. *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.
36. *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.
37. *Логанов Ю. Д., Соболевский В. В., Симонов В. М.* Открытые фонтаны и борьба с ними: Справочник. — М.: Недра, 1991. — 189 с.
Loganov Yu. D., Sobolevskii V. V., Simonov V. M. Open fountains and dealing with them. Handbook. Moscow, Nedra, 1991, 189 p. (In Russian).
38. *Богоявленский В. И., Сизов О. С., Мажаров А. В. и др.* Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал

// Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 1 (33). — С. 88—105.
Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Mazharov A. V. et al. Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the Seyakha catastrophic gas blowout on the Yamal Peninsula. Arctic: Ecology and Economy, 2019, no. 1 (33), pp. 88—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105. (In Russian).
39. *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).
40. *Эдельштейн К. К., Алабян А. М., Горин С. Л., Попрядухин А. А.* Гидрологические особенности крупнейших озер полуострова Ямал // Тр. Карельского науч. центра РАН. — 2017. — № 10. — С. 3—16.
Edelstein K. K., Alabyan A. M., Gorin S. L., Popryadukhin A. A. Hydrological and hydrochemical features of the largest lakes of the Yamal Peninsula. Transactions of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2017, no. 10, pp. 3—16. Available at: https://doi.org/10.17076/lim571. (In Russian).
41. *Кругликов Н. М., Кузин И. Л.* Выходы глубинного газа на Уренгойском месторождении // Тр. ЗапСибНИГНИ. — 1973. — Вып. 37. — С. 96—106.
Kruglikov N. M., Kuzin I. L. Gas emissions on the Urengoy field. Tr. ZapSibNIGNI, 1973, vol. 37, pp. 96—106. (In Russian).
42. *Брушков А. В., Жданеев О. В., Фролов К. Н.* Основы мерзлотоведения. — М.: Академ. проект, 2024. — 190 с.
Brushkov A. V., Zhdaneev O. V., Frolov K. N. Fundamentals of Permafrost Science. Moscow, Academic Project, 2024, 190 p.
43. *Bondur V., Chimitdorzhiev T., Dmitriev A.* A Step-Wise Workflow for SAR Remote Sensing of Perennial Heaving Mound/Crater on the Yamal Peninsula, Western Siberia. Remote Sensing, 2023, no. 15, p. 281. Available at: https://doi.org/10.3390/rs15010281.
44. 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. Available at: https://doi.org/10.3390/rs15010281. (In Russian).

Информация об авторах

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

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

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

Гаврилов Артем Алексеевич, инженер, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: artemgavrilov@ipng.ru.

ANOMALOUS RAPID GROWTH AND EXPLOSION OF THE C23 YAMAL GAS-DYNAMIC HEAVING MOUND IN 2020—2024

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

The article was received on July 7, 2025

Abstract

During the Yamal-2024 expedition, the authors studied for the first time the C23 site of catastrophic gas explosion on August 30, 2024 in the area of the Bovanenkovo oil and gas condensate field, Yamal Peninsula, on the slope of the marine terrace. Based on the photogrammetric processing of 463 UAV aerial images, 3D-model and digital twins of the C23 object were built, including the ones in virtual reality controlled by artificial intelligence. Monitoring studies from 2011 to 2024 using RS (remote sensing) data (ArcticDEM and UAVs) revealed an anomalous high average perennial heaving mound growth rate of about 40 cm/year for four years before its explosion, which, together with similar data previously obtained at sites C11, C17 and C22, can serve as the main criterion for identifying explosive perennial heaving mounds. Thus the authors have confirmed the endogenous gas-dynamic mechanism of the perennial heaving mound growth with subsequent powerful blowout, self-ignition and gas explosion with the formation of a crater in the cavity top. The results make it possible to reduce the risk of emergency and catastrophic situations at the oil and gas facilities in the Arctic.

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 field research of the OGRI RAS on the basis of the Agreement on Scientific and Technical Cooperation.

The authors thank V. N. Polozov, Chief Engineer — First Deputy General Director of Gazprom Dobycha Nadym LLC, and A. B. Osokin, Deputy Head of the Engineering and Technical Center of Gazprom Dobycha Nadym LLC for assistance in organizing and conducting field work and useful recommendations when discussing 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: vib@ipng.ru.

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

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

Gavrilov, Artem Alekseevich, Engineer, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: artemgavrilov@ipng.ru.

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