

МОНИТОРИНГ РАЗВИТИЯ МОРДЫЯХСКОГО ОБЪЕКТА ВЗРЫВА ГАЗА НА ЯМАЛЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

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

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2022 г.

Выполнено комплексное исследование Мордыяхского объекта С15 катастрофического выброса газа в 2017 г. на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, включая цифровые 3D-модели ArcticDEM. По данным ДЗЗ доказан быстрый рост многолетнего бугра пучения (МБП) С15 в высоту около 1 м в течение 14,5 месяцев с 19 марта 2012 г. по 6 июня 2013 г., а в последующие четыре года скорость его роста составила около 10 см в год. Установлено, что в период с 8 по 19 июня 2017 г. произошел взрыв сводовой части МБП с образованием кратера. В результате фотограмметрической обработки аэрофотоснимков из вертолета построена высокодетальная 3D-модель кратера по состоянию на 26 августа 2020 г. Зафиксирован разлет кусков мерзлого грунта на удаления до 90 м и рассчитан примерный объем самых крупных из них, составивший около 40–50 м³. В итоге работы подтвержден эндогенный газодинамический механизм роста МБП с последующими мощными выбросами и взрывами газа с образованием гигантских кратеров. Результаты способствуют повышению безопасности функционирования объектов нефтегазового комплекса в Арктике.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, подземный лед, многолетний бугор пучения (МБП), пинго, выброс газа, кратер, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), цифровая модель рельефа (ЦМР), ArcticDEM.

Введение

В 2014 г. большое внимание мирового научного сообщества было привлечено к ранее неизвестным явлениям в Арктике, связанным с взрывными процессами, приводящими к формированию гигантских кратеров в многолетнемерзлых породах [1—9]. В последующие годы к изучению этого явления подключился ряд отечественных и зарубежных ученых различных специальностей [10—16]. В итоге исследований практически все ученые едины во мнении о газо-взрывном механизме происходящих событий, однако описания генезиса всего процесса различны: от традиционных модификаций экзогенно-криогенного механизма формирования и взрыва многолетних бугров пучения (МБП — булгуньяхи/пинго) [12—16] до решающей роли эндогенного фактора

при формировании подземной газонасыщенной термокарстовой полости с газодинамическим механизмом роста и взрыва МБП с образованием гигантского кратера с повторяющимися (вулканоподобными) выбросами газа [1—5; 17—20].

За прошедшие годы появились многочисленные научные публикации, посвященные обнаружению и изучению новых подобных объектов, которых в геоинформационной системе «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО»), созданной и постоянно развиваемой в Институте проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН, насчитывается около 20 [17—22]. Уровень достоверности информации о природе обнаруженных кратероподобных объектов значительно различается, что связано с их ограниченной доступностью для валидации в ходе экспедиционных исследований и/или с отсутствием координат их расположения (в ГИС «АМО» имеется несколько таких объектов) при наличии подтверждающих видео- и фотоматериалов.

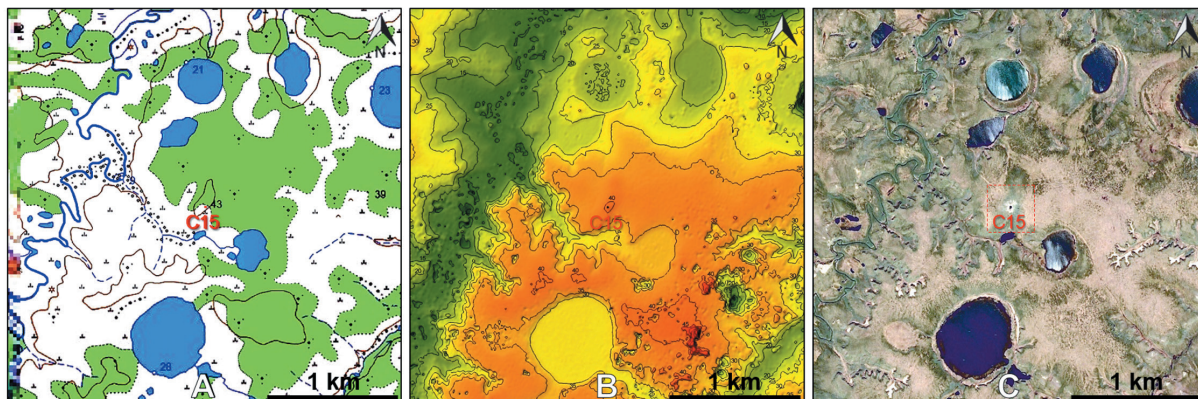


Рис. 1. Расположение Мордыяхского объекта C15: А — фрагмент топографической карты масштаба 1:100 000; В — ЦМР ArcticDEM 6 июня 2013 г.; С — космоснимок WorldView-2 21 июня 2018 г. (ESRI)
Fig. 1. Location of the Mordyakh object C15: А — a topographic map fragment (scale 1:100 000); В — DEM (digital elevation model) ArcticDEM (June 6, 2013); С — WorldView-2 (June 21, 2018, ESRI)

териалов, предоставленных коренным населением. Поэтому при постоянной тенденции роста количество подтвержденных кратеров выбросов газа корректируется.

Основной целью данной работы является комплексный анализ генезиса кратероподобного объекта, зарегистрированного в ГИС «АМО» под номером C15. Данный объект также получил название Мордыяхский, что обусловлено его близким расположением (2,3 км на юг) к ямальской реке Мордыяха (также называемой Морды-Яха и Мурты-Яха).

Краткий геолого-географический очерк

В территориальном плане Мордыяхский объект C15 расположен в центральной части Ямала на удалении 79 км от западного побережья, почти строго к востоку от поселка Марре-Сале (также Марресале). Полуостров Ямал относится к северной части Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна, в котором открыты месторождения с гигантскими запасами углеводородного сырья преимущественно газового состава [23], имеющие высокую мировую значимость. В одной лишь Бованенковско-Харасавэйско-Крузенштернской зоне обнаружены залежи газа с запасами около 9 трлн м³, при этом потенциал глубоких горизонтов еще недостаточно изучен и разведан [23; 24].

Относительно открытых газоконденсатных (ГКМ) и нефтегазоконденсатных (НГКМ) месторождений объект C15 характеризуется значительной удаленностью: в 55 км южнее Бованенковского НГКМ, в 27 км к востоку от Байдарацкого ГКМ и в 55 км к юго-западу от Нейтинского ГКМ. Ближайшая глубокая скважина нефтегазопроискового бурения Байдарацкая-1 (забой 2316 м) была пробурена в 1987 г. и расположена в 35 км к западу от объекта C15. Ближайшая потенциально нефтегазоносная структура, выделенная по данным сейсморазведки методом общей глубинной точки и не вскрытая бу-

рением, обнаружена примерно в 10,6 км от объекта C15 в северо-восточном направлении.

Касательно инфраструктуры нефтегазовой отрасли объект C15 находится в 20 км к востоку от магистрального газопровода Бованенково — Ухта и в 32 км к юго-западу от железной дороги Обская — Бованенково — Карская.

Первое упоминание и краткая характеристика объекта C15 были даны в нашей работе [19]. Отметим, что объект C15 расположен в 4,3 км к востоку от подобного объекта C16 и в 31 км южнее наиболее хорошо изученного Бованенковского кратера C1 [1—9; 18—22 и др.]. Кратер C15 и большинство других обнаруженных кратеров приурочены к возвышенным частям рельефа местности (морская терраса) (рис. 1), а не к котловинам высохших термокарстовых озер (хасырей), в которых под действием криогенных процессов нередко образуются МБП (булгуньяхи/пинго) [18—22; 25].

Район исследований характеризуется широким распространением термокарстовых озер (см. рис. 1, А и С), при этом на дне некоторых из них наблюдаются кратеры выбросов газа. Также в центральной части Ямала, включая район расположения объекта C15, особенно широко распространены массивы подземного льда, обнаруженные в многочисленных обнажениях и в результате бурения мерзлотно-параметрических скважин ООО НТФ «Криос» [26—29]. Распространение массивов подземного льда важно в связи с выявленным фактом приуроченности к ним всех исследованных кратеров выбросов газа [1—9; 18—22].

Методы дистанционных исследований

Проводимые нами исследования в значительной степени базируются на использовании различных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. При этом общедоступные космоснимки (КС) среднего разрешения (например, Sentinel и Landsat) позволяют определить временной интер-

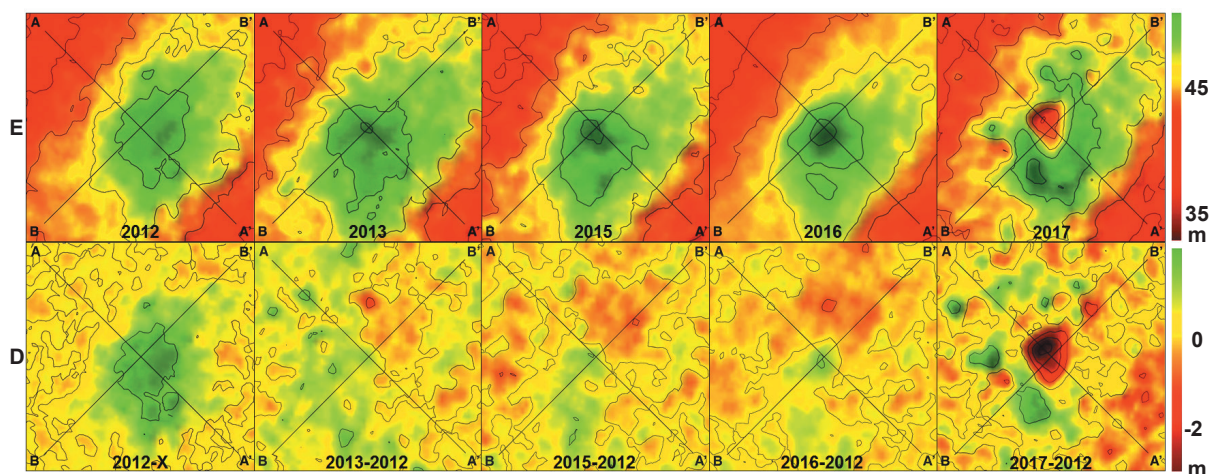


Рис. 2. Результаты 3D и 4D-мониторинга развития Мордыяхского объекта C15 по данным ЦМР ArcticDEM 2012–2017 гг. (E) и различия ЦМР по годам мониторинга по сравнению с 2012 г. (D). Примечания: конкретные даты ЦМР приведены в табл. 1; A-A' и B-B' – положения двух разрезов, приведенных на рис. 3

Fig. 2. Results of 3D and 4D monitoring of the Mordyyakha object C15 development according to the ArcticDEM data for 2012–2017 (E) and DEM differences by year of monitoring compared to 2012 (D). Notes: specific dates of the DEM are given in Table 1; A-A' and B-B' – positions of the two cross-sections shown in Fig. 3

вал взрывного события, а КС высокого разрешения (например, WorldView (WV), GeoEye (GE), PlanetScope (PS), Ресурс-П, Канопус-В) дополнительно позволяют проанализировать крупные фрагменты изучаемых объектов, что способствует их валидации [1–3; 10; 17–22].

В последние годы при выявлении и мониторинге развития потенциально опасных объектов (например, объектов выброса газа C1, C11, C17) мы с большой эффективностью применяем цифровые модели рельефа и местности (ЦМР), получаемые при фотограмметрической обработке КС высокого разрешения [18–22; 30–33]. В Полярном геопространственном центре PGC (Polar Geospatial Center, www.pgc.umn.edu) Университета Миннесоты (США) на основе фотограмметрической обработки КС WV-1, WV-2, WV-3 и GE-1 созданы ЦМР ArcticDEM с разрешением 2 м [34]. При этом для территории Арктики доступна единая ЦМР, собранная в виде мозаичных тайлов (tiles — участки 100×100 км), сабтайлов (subtiles — 50×50 км), а также разновременных полос пролета спутников — стрипов (strips) 110–120 км в длину и 16–18 км в ширину [22; 34].

Необходимо отметить, что практически все ЦМР ArcticDEM в разной степени далеки от совершенства, что обусловлено в основном наличием погрешности пространственной привязки исходных КС, наличием отдельных выбросов и фактической невозможностью работы по открытым водоемам [21; 22]. Кроме того, нередко встречаются отдельные бракованные значения амплитуд рельефа непонятного происхождения. Например, такие погрешности, видимо, наблюдаются в юго-восточной части ЦМР (см. на рис. 1B аномальные локальные поднятия красного цвета). Подробнее достоинства и недо-

статки ЦМР ArcticDEM рассмотрены в работах PGC [34] и авторов данной статьи на примерах ямальских объектов катастрофических выбросов газа C1, C11 и C17 [21; 22].

Во время экспедиций важная детализационная информация получается при аэрофотосъемке, особенно с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [20–22; 31–33]. Эти данные ДЗЗ позволяют не только сохранять и анализировать цифровые фотографии изучаемых объектов в высоком разрешении, но и строить с высокой точностью характеризующие их форму и геометрические размеры трехмерные (3D) ЦМР. Цифровая фотограмметрическая обработка данных выполняется с применением специализированного программного обеспечения (ПО) Pix4Dmapper (Pix4D SA, Швейцария) и Agisoft Metashape Professional (Geoscan, Россия) [35]. Картографические отображения и построения 3D-моделей осуществляются с применением ПО ArcGIS (ESRI, США).

Результаты дистанционных исследований

В ряде наших работ мы показали высокую эффективность выявления и мониторинга развития геодинамических процессов (термоденудация берегов морей, рек, озер и участков суши, рост МБП, образование кратеров после выбросов газа и др.) на основе комплексного анализа данных ДЗЗ, особенно трехмерных (3D) ЦМР ArcticDEM, построенных PGC [21; 22; 34]. Повторные аэрофотосъемки с заданным интервалом времени позволяют строить серии 3D-ЦМР, автоматизированное сопоставление которых проводится при построении разностных 4D-моделей, несущих качественные и количественные характеристики изменений изучаемых объектов (форма и геометрические размеры) во времени (чет-

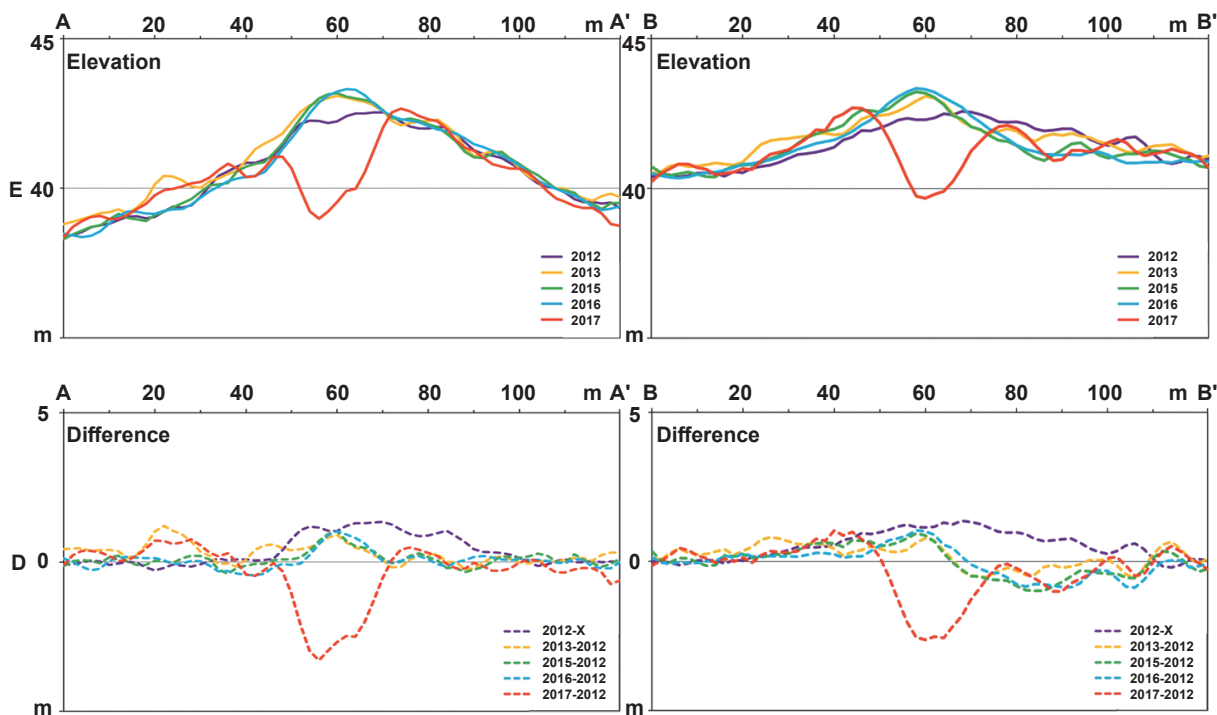


Рис. 3. Мониторинг развития Мордыякского объекта C15 по ЦМР ArcticDEM 2012–2017 гг. по профилям A-A' и B-B'.
Примечание: E – альтитуды рельефа, D – различия разновременных ЦМР; положение профилей показано на рис. 2
Fig. 3. Monitoring of the Mordvyakha object C15 development according to the ArcticDEM 2012–2017 along profiles A-A' and B-B'.
Notes: E – relief elevations, D – differences in multitemporal DEM; the position of the profiles is shown in Fig. 2

вертое измерение) и позволяющих прогнозировать последующие возможные изменения [21; 22].

По состоянию на октябрь 2018 г. для района Мордыякского объекта C15 PGC были рассчитаны ЦМР ArcticDEM по пяти разновременным стрипам: WV-1 19 марта 2012 г., WV-1 6 июня 2013 г., WV-3 12 октября 2015 г., WV-3 19 июня 2016 г. и WV-1 19 июня 2017 г., фрагменты которых размером 100×100 м приведены на рис. 2Е. В связи со значительным разбросом средних уровней ЦМР относительно уровня моря, достигавшим 7,5 м (между ЦМР 2012 и 2017 гг.), все ЦМР ArcticDEM были приведены к единому уровню согласно топографической карте масштаба 1:100 000 (см. рис. 1А).

В качестве базовой для получения четырех разностных ЦМР (рис. 2D: 2013—2012, 2015—2012, 2016—2012 и 2017—2012 гг.) была взята самая ранняя ЦМР 2012 г. [21; 22]. Разностные ЦМР отображают все изменения рельефа местности, включая рост МБП. На рис. 2D ЦМР за 2012 г. сравнивалась с искусственной ЦМР X, полученной в результате устранения замкнутых изолиний, отображающих объект исследований C15 (подробнее пояснено в [21; 22]). При этом разностные модели по сути являются 4D-моделями, а на модели 2012-X отображен вид МБП в 2012 г. без влияния региональной составляющей. Кроме того, по всем 3D и 4D-моделям, приведенным на рис. 2 (E и D), были построены разрезы по двум ортогональным профилям A-A' и B-B' (рис. 3),

положение которых показано на рис. 2. Эти разрезы иллюстрируют детальные изменения поверхности земли в процессе роста МБП и его взрыва с образованием кратера в 2017 г. (рис. 3). В частности, видно существенное (до 1,7 м) проседание поверхности земли к северо-востоку от МБП.

Определение даты взрыва с формированием кратера проведено на основе анализа ретроспективных данных ДЗЗ с различных космических аппаратов. Для этих целей доступен широкий спектр КС последних десятилетий, сделанных с зарубежных (Sentinel, Landsat, PlanetScope и др.), а также отечественных (Ресурс-П и Канопус-В) спутников. Для примера на рис. 4 приведены три фрагмента (размер 870×870 м) наиболее кондиционных КС высокого пространственного разрешения (около 2 м) Канопус-В. По этим КС видно наличие МБП 18 июля 2013 г. и частично затопленного водой кратера 13 июля 2018 г. К сожалению, в настоящее время космосъемка в Арктике с отечественных аппаратов не является высокочастотной, нам было доступно лишь ограниченное количество КС, не позволившее существенно сузить временной диапазон взрыва МБП C15.

На рис. 5 приведено 12 фрагментов разновременных КС размером 400×400 м, охватывающих период с 21 августа 1968 г. (Corona Keyhole — KH-4B [36]) до 11 июля 2022 г. (Sentinel). Анализ подобранных КС позволяет сделать вывод, что выброс газа с об-

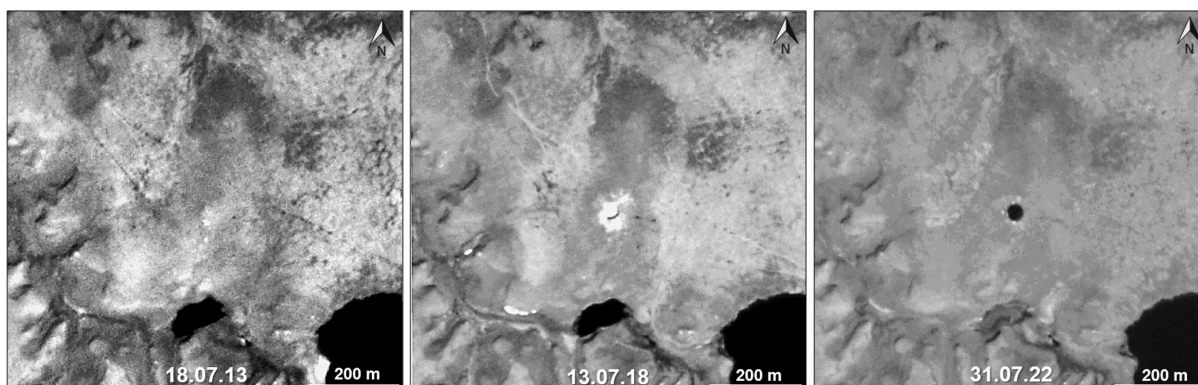


Рис. 4. Мониторинг состояния объекта C15 по космоснимкам спутника Канопус-В 18 июля 2013 г., 13 июля 2018 г. и 31 июля 2022 г.

Fig. 4. Monitoring of the object C15 state using satellite images from the Kanopus-V satellite on July 18, 2013, July 13, 2018 and July 31, 2022

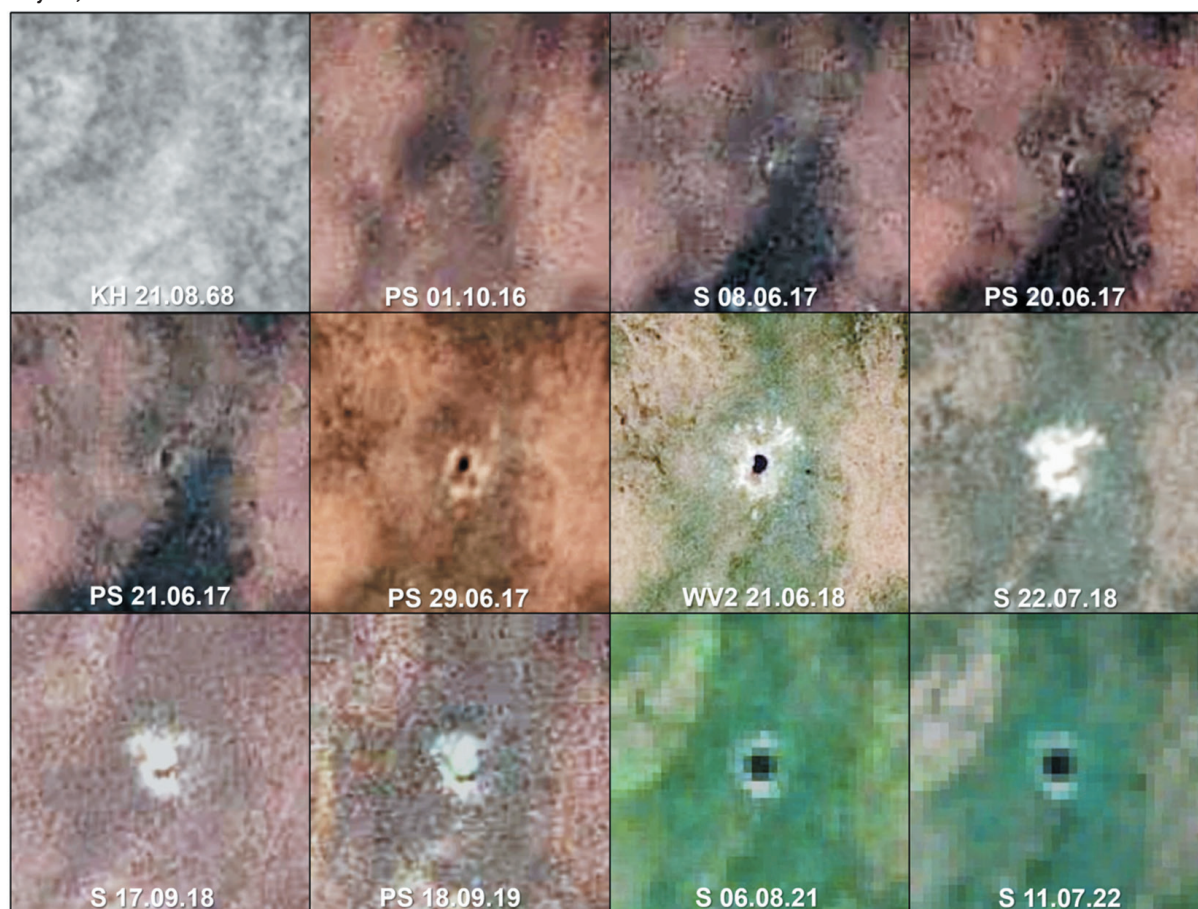


Рис. 5. Мониторинг состояния объекта C15 по космоснимкам со спутников KH-4B/Corona (KH), Sentinel-2A и 2B (S), PlanetScope (PS) и WorldView-2 (WV2) в 1968–2022 гг.

Fig. 5. Monitoring of the object C15 state by images from the satellites KH-4B/Corona (KH), Sentinel-2A and 2B (S), PlanetScope (PS) and WorldView-2 (WV2) in 1968–2022

разованием кратера произошел между 8 и 20 июня 2017 г. С учетом того, что по ЦМР ArcticDEM 19 июня 2017 г. кратер уже существовал (см. рис. 2 и 3), можно сделать вывод, что взрыв МБП произошел в период с 8 по 19 июня 2017 г.

Несмотря на организационные сложности, в основном вызванные разгаром пандемии COVID-19,

в августе 2020 г. состоялись наши комплексные экспедиционные исследования ряда объектов взрывной дегазации недр в центральной части полуострова Ямал, часть которых отражена в опубликованных результатах изучения Бованенковского кратера C17 и Сеяхинского кратера C11 [20–22; 30–33]. В ходе полевых работ также выполнялась валидация ряда

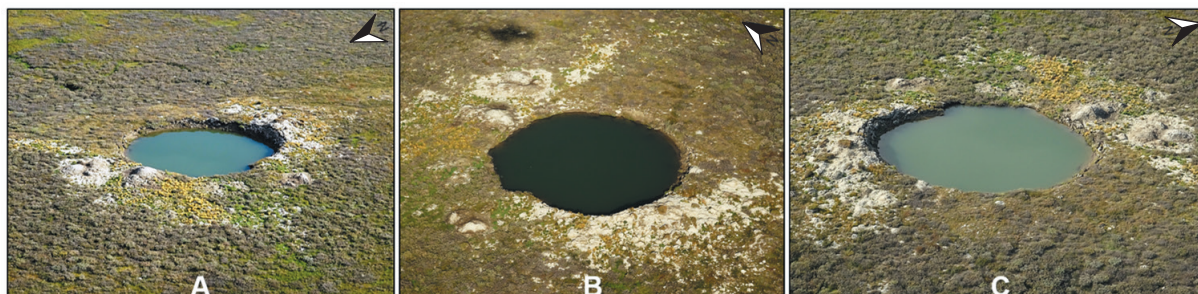


Рис. 6. Фрагменты разноазимутальных аэрофотоснимков из вертолета Мордыяхского кратера C15 26 августа 2020 г. (фото В. И. Богоявленского)

Fig. 6. Fragments of multi-azimuth aerial images of the Mordyyakha crater C15 from a helicopter on August 26, 2020 (photo by V. I. Bogoyavlensky)

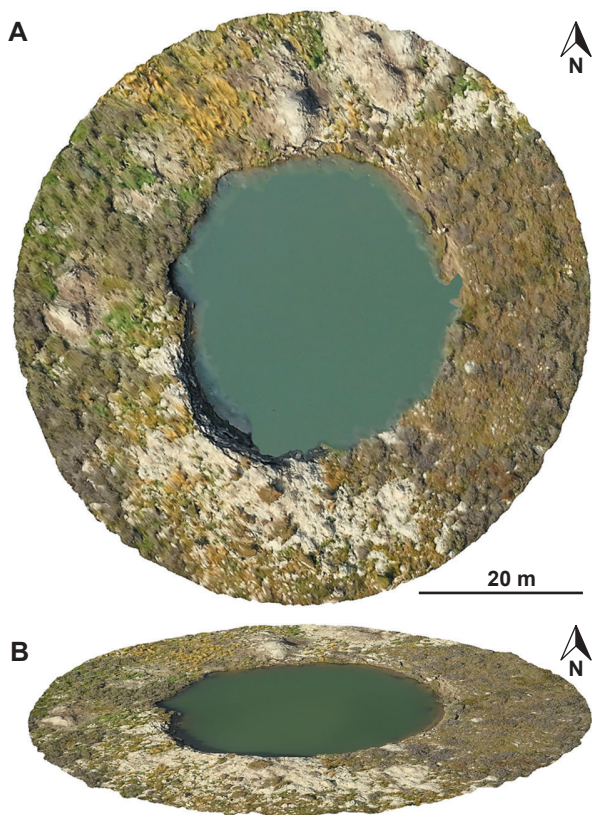


Рис. 7. Трехмерная ЦМР Мордыяхского объекта C15, построенная при обработке аэрофотоснимков 26 августа 2020 г. в плане (А) и угловой проекции (В)

Fig. 7. 3D DEM of the Mordyyakha object C15 developed during the processing of aerial images on August 26, 2020 in plan (A) and angular projection (B)

новых объектов, обнаруженных ранее в ходе комплексной обработки и интерпретации данных ДЗЗ, включая Мордыяхский объект C15.

На рис. 6 приведены 3 из 13 разноазимутальных аэрофотоснимков Мордыяхского объекта C15, сделанных с борта вертолета Ми-8 во время кругового облета 26 августа 2020 г. фотоаппаратом Sony DSC-HX60V. Визуальный анализ аэрофотоснимков позволяет сделать однозначный вывод о взрывном харак-

тере событий, приведших к выбросу значительной части мерзлого грунта вокруг округлой формы озера, которое по генезису признано затопленным кратером выброса газа.

Сделанные аэрофотоснимки Мордыяхского кратера C15 послужили основой для построения 3D ЦМР местности (с учетом кустарниковой растительности) в ПО Agisoft Metashape Professional [35], выполняющем фотограмметрическую обработку. Все фотографии Sony DSC-HX60V имели одинаковые характеристики — разрешение 5184×3888 пикселей, фокусное расстояние 22,15, диафрагму F/5,6, ISO 80 и выдержку 1/200. Также технические возможности фотоаппарата позволяют прописывать для каждой фотографии географические координаты места съемки кадра, однако по неизвестной причине в момент облета кратера C15 датчик позиционирования GPS не сработал, и в результате у полученных кадров отсутствует пространственная привязка. Отметим, что для построения ЦМР географические координаты каждой фотографии желательны, но не обязательны. Необходимо лишь учитывать перечисленные фотографические свойства и характеристики модели фотоаппарата.

При обработке были выбраны 8 из 13 фотографий, а 5 были отсеяны по причине их наибольшей удаленности от объекта исследований. Несмотря на небольшое количество использованных аэрофотоснимков, в результате фотограмметрической обработки в ПО Agisoft Metashape удалось построить ЦМР объекта C15 хорошего качества (рис. 7). Ранее подобные построения ЦМР по ретроспективным аэрофотоснимкам 2015—2017 гг. были успешно выполнены для ряда других подобных объектов, включая кратер C1, что позволило сохранить их 3D-модели до начала применения нами специализированной съемки с БПЛА.

Обсуждение результатов

Согласно результатам построения ЦМР ArcticDEM (см. рис. 2 и 3) Мордыяхского объекта C15 в 2012 г. на наиболее возвышенной части морской террасы, имеющей валообразную форму северо-восточной ориентации (видно на рис. 1 и 2Е), существовало

обособленное поднятие — МБП с размерами основания эллиптической формы около 55×105 м при высоте не более 1,5 м. В однолетний период 2012—2013 гг. произошел быстрый рост центральной (сводовой) части этого МБП размером около 20×30 м примерно на 1 м. В последующий четырехлетний период до 2017 г. это поднятие выросло незначительно — не более чем на 0,3—0,4 м. При этом общая высота МБП составила около 3 м. По данным разновременных КС и ЦМР ArcticDEM установлен временной период взрыва МБП — с 8 по 19 июня 2017 г. Взрыву подверглась лишь сводовая часть МБП, на месте которой образовался кратер, реальная глубина которого по данным ДЗЗ не определяется из-за известного эффекта «черной дыры» (недостаточная освещенность солнечным светом дна и стенок кратера), рассмотренного ранее на примере Бованенковского кратера С17 в своде кровли гигантской подземной полости [20; 21].

Судя по данным ArcticDEM (см. рис. 2 и 3), по состоянию на 19 июня 2017 г. (стрип КС WV1) кратер выброса газа в своде МБП С15 имел асимметричную форму, и его размеры по верхней замкнутой изолинии (см. рис. 2Е) изменялись от 16 до 20 м (максимально — в северном направлении). По данным КС WV2 21 июня 2018 г. размеры кратера по контуру воды составили 15×24 м, а по состоянию на 26 августа 2020 г. размеры значительно увеличились и достигли 29×37 м. По данным аэрофотоснимков разлет обнаруженных крупных фрагментов грунта достигает 90 м.

Судя по ЦМР ArcticDEM на дату 19 июня 2017 г. (см. рис. 2Е, 2017 г.), вокруг кратера существовал крупный бруствер из выброшенной взрывом мерзлой породы и, вероятно, ледогрунта в южной, восточной и северной частях его бортов (больше всего в южной части). Очевидно, что за счет термоденудационных процессов с увеличением размеров кратера большая часть бруствера обвалилась внутрь него. Оставшийся мерзлый грунт оттаял и расплылся на поверхности земли, а ледогрунт растаял практически бесследно (см. рис. 6). Отсутствие импактных воронок на поверхности земли от падения глыб ледогрунта, которые были обнаружены на ряде других объектов, включая С3 и С11 [17; 30; 31; 33], свидетельствует, что во время взрыва МБП активный слой еще не растаял, т. е. дата взрыва, видимо, ближе к 8 июня, чем к 19 июня.

Анализ среднегодовых температур на метеостанции Марре-Сале (https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Марресале) за 12-летний период 2010—2021 гг. показал, что изучаемый МБП объекта С15 перенес без взрыва аномально жаркие летние сезоны 2012 и 2016 гг. (–3,6°) и взорвался лишь в 2017 г., в котором температура была –4,5°, что лишь на 0,95° выше средней за 12 лет (–5,45°). Апрель и май 2017 г. были рекордно холодными за 12-летний период, соответственно –13,4° и –7,2°, и значительно ниже средних за 12 лет (–8,8° и –3,3°). В 2017 г. устойчивое пре-

обладание положительных температур началось лишь с приходом июня. При этом в июне средняя температура составила всего 2,8°, что на 1,2° ниже средней за 12 лет (4,0°). Отсутствие зеленой растительности на июньских КС (см. рис. 5) подтверждает существенную задержку прихода летней погоды и таяния активного слоя. В связи с вышесказанным можно утверждать, что произошедшее весенне-летнее ослабление упруго-прочностных свойств активного слоя отставало от среднегодовых и не оказало ключевого воздействия, приведшего к взрыву МБП, а лишь могло немного его ускорить.

Не вызывает сомнений, что МБП С15, расположенный на вершине морской террасы, относится к открытой, а не к закрытой газогидродинамической системе [18; 19], как классические булгуньяхи/пинго, образующиеся за счет действия криогенного механизма в хасыреях. С учетом специфики взрыва МБП можно признать его образование за счет эндогенного газодинамического механизма.

Заключение

В результате комплексных исследований данных ДЗЗ Мордыхского объекта С15 доказано, что по своему генезису он является МБП с газодинамическим механизмом роста и взрыва. В период с 8 по 19 июня 2017 г. на этом МБП произошел мощный выброс газа со взрывом сводовой части, которая в течение 14,5 месяцев с 19 марта 2012 г. по 6 июня 2013 г. аномально быстро выросла в высоту примерно на 1 м. По данным ДЗЗ установлено, что наиболее крупные выброшенные фрагменты мерзлого грунта имели максимальные размеры до 5—7 м, при этом их объем достигает 40—50 м³ (вес около 100 т), а максимальная дальность разлета обнаруженных фрагментов грунта составила 90 м. За двухлетний период с 21 июня 2018 г. по 26 августа 2020 г. размеры кратера увеличились по разным направлениям в 1,5—2 раза (с 15×24 м до 29×37 м).

Благодаря фотограмметрической обработке серии аэрофотоснимков, сделанных с борта вертолета Ми-8 26 августа 2020 г., построена трехмерная ЦМР объекта С15, допускающая ее использование для последующих исследований.

В итоге комплексного изучения Мордыхского объекта С15 по данным ДЗЗ подтвержден эндогенный газодинамический механизм роста МБП, мощных выбросов и взрывов газа с образованием гигантских кратеров. Результаты могут способствовать повышению безопасности функционирования объектов нефтегазового комплекса в Арктике благодаря снижению рисков взрывных выбросов газа.

Авторы признательны Правительству Ямало-Ненецкого автономного округа и лично заместителю губернатора А. В. Мажарову, а также директору Некоммерческого партнерства «Российский центр освоения Арктики» А. Н. Умникову за постоянную

помощь в организации экспедиционных научных исследований в Арктике.

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».

Литература/References

1. Богоявленский В. И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов: Монография // Тр. Вольного экон. общества. — 2014. — Т. 182, № 3. — С. 12—175.
Bogoyavlensky V. I. Arctic and the World Ocean: Current State, Perspectives and Challenges of Hydrocarbon Production. Tr. Vol'nogo ekon. obshchestva, 2014, vol. 182, no. 3, pp. 12—175. (In Russian).
2. 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).
3. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. — Ч. 2 // Бурение и нефть. — 2014. — № 10. — С. 4—8.
Bogoyavlensky V. I. The threat of catastrophic gas blowouts from the Arctic cryolithozone. Yamal and Taymyr craters. Pt. 2. Oil and Drilling, 2014, no. 10, pp. 4—8. (In Russian).
4. *Bogoyavlensky V. Gas Blowouts on the Yamal and Gydan Peninsulas. GeoExPro [London], 2015, vol. 12, no. 5, pp. 74—78.*
5. Богоявленский В. И., Гарагаш 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 ejection craters in the Arctic by mathematical modeling. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2015, no. 3 (19), pp. 12—17. (In Russian).
6. Лейбман М. О., Плеханов А. В. Ямальская воронка газового выброса: результаты предварительного обследования // Холод'ОК: науч.-популяр. журн. — 2014. — № 2 (12). — С. 9—15.
Leibman M. O., Plekhanov A. V. Yamal gas blowout crater: the results of preliminary examination. Kholod'OK: scientific-popular magazine, 2014, no. 2 (12), pp. 9—15. (In Russian).
7. 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. Geogr. Environ. Sustain., 2014, 7, pp. 68—80.

8. Кизяков А. И., Сонюшкин А. В., Лейбман М. О. и др. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на Центральном Ямале // Криосфера Земли. — 2015. — 2. — С. 15—25.
Kizyakov A. I., Sonyushkin A. V., Leibman M. O. et al. Geomorphological conditions for the formation of a gas outburst funnel and the dynamics of this form in Central Yamal. Kriosfera Zemli, 2015, 2, pp. 15—25. (In Russian).
9. Оленченко В. В., Синуцкий А. И., Антонов Е. Ю., Ельцов И. Н., Кушнаренко О. Н., Плотников А. Е., Потанов В. В., Эпов М. И. 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., Eltsov I. N., Kushnarenko O. N., Plotnikov A. E., Potapov V. V., Epov M. I. Results of geophysical studies of the territory of the geological formation "Yamal crater". Kriosfera Zemli, 2015, vol. 19, no. 4, pp. 94—106. (In Russian).
10. Сизов О. С. Дистанционный анализ последствий поверхностных газопоявлений на севере Западной Сибири // Геоматика. — 2015. — № 1. — С. 53—68.
Sizov O. S. Remote analysis of consequences of surface gas shows in the north of Western Siberia. Geomatika, 2015, no. 1, pp. 53—68. (In Russian).
11. Бадю Ю. Б. Криогенная толща газонесущих 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, Nauchnyi mir, 2018, 232 p. (In Russian).
12. Kizyakov A., Khomutov A., Zimin M., Khairullin R., Babkina E., Dvornikov Y., Leibman M. Microrelief associated with gas emission craters: Remote-sensing and field-based study. Remote Sens., 2018, 10, 677.
13. Buldovicz S. N., Khilimonyuk V. Z., Bychkov A. Y. et al. Cryovolcanism on the earth: Origin of a spectacular crater in the Yamal Peninsula (Russia). Sci. Rep., 2018, 8, p. 13534.
14. Хименков А. Н., Сергеев Д. О., Власов А. Н. и др. Взрывные процессы в области распространения многолетнемерзлых пород — новый вид геокриологической опасности // Геоэкология. Инженер. геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2019. — № 6. — С. 30—41.
Khimenkov A. N., Sergeev D. O., Vlasov A. N. et al. Explosive processes in the permafrost zone as a new type of geocryological hazard. Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya, 2019, no. 6, pp. 30—41. (In Russian).
15. Chuvilin E., Stanilovskaya J., Titovsky A. et al. A gas emission crater in the Erkuta River valley, Yamal Peninsula: characteristics and potential formation model. Geosciences, 2020, 10, p. 170.

16. Zolkos S., Fiske G., Windholz T., Duran G. et al. Detecting and Mapping Gas Emission Craters on the Yamal and Gydan Peninsulas, Western Siberia. *Geosciences*, 2021, 11, 21. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences11010021>.
17. 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. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2018, no. 1 (29), pp. 48—55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55. (In Russian).
18. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Гор. пром-сть. — 2020. — № 1. — С. 97—118. Bogoyavlensky V. I. Natural and technogenic threats in fossil fuels production in the Earth cryolithosphere. *Russian Mining Industry*, 2020, pp. 97—118. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118. (In Russian).
19. 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. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 1, pp. 51—66. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-51-66. (In Russian).
20. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Kargina T., Chuvin E., Bukhanov B., Umnikov A. New Catastrophic Gas Blowout and Giant Crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the Expedition and Data Processing. *Geosciences*, 2021, 11, 71, 20 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences11020071>.
21. 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. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 3, pp. 362—374. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-362-374. (In Russian).
22. 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. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2020, no. 4 (40), pp. 90—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-90-105. (In Russian).
23. 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).
24. Полякова И. Д., Богоявленский В. И. Баженовская свита — источник промышленных нефтей и жирных газов в титон-неокомских отложениях Южно-Карского региона // Докл. Акад. наук. — 2011. — Т. 440, № 1. — С. 105—110. Polyakova I. D., Bogoyavlensky V. I. The Bazhenovo Formation as a Source of Economic Oils and Rich Gases in the Tithonian-Neocomian Section of the South Kara Region. *Doklady Earth Sciences*, 2011, vol. 440, no. 1, pp. 1270—1275.
25. 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. 271—323.
26. Дубиков Г. И., Корейша М. М. Инъекционные ископаемые льды на полуострове Ямал // Изв. АН СССР. Сер. географ. — 1964. — № 5. — С. 58—65. Dubikov G. I., Koreysa M. M. Injection fossil ice on the Yamal Peninsula. *Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Ser. geographer*, 1964, no. 5, pp. 58—65. (In Russian).
27. 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. Main patterns of distribution and types of reservoir deposits of underground ice in the northern part of the West Siberian plate. *Formation ice permafrost*. Yakutsk, IM SO AN SSSR, 1982, pp. 13—24. (In Russian).
28. Васильчук Ю. К. Пластовые ледяные залежи в пределах Бованенковского ГКМ (Центральный Ямал) // Инженер. геология. — 2010. — Сент. — С. 48—65. Vasilchuk Yu. K. Massive ice of Bovanenkovo Gas-condensate Field (the Central Yaval Peninsula). *Engineering Geology*, 2010, September, pp. 48—65. (In Russian).
29. Streletskaia I. D., Ukraintseva N. G., Drozdov I. D. Late Pleistocene history reconstruction based on the massive ground ice origin in the Arctic coastal zone. Moscow, MGU, 2001. Available at: <http://www.geogr.msu.ru/cafedra/crio/Tabular/>.
30. 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., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kishankov A. V., Kargina T. N. Earth degassing in the Arctic: Remote and field studies of the Seyakha catastrophic gas emission on the Yamal Peninsula. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2019, no. 1 (33), pp. 88—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105. (In Russian).

31. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Kishankov A.* Complex of geophysical studies of the Seyakha catastrophic gas blowout crater on the Yamal Peninsula, Russian Arctic. *Geosciences*, 2020, 10, 215. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences10060215>.

32. *Bogoyavlensky V. I.* Innovative Technologies and Results of Studying Processes of Natural and Man-Made Degassing of the Earth in the Lithosphere-Cryosphere-

Hydrosphere-Atmosphere System. Third International Conference on Geology of the Caspian Sea and Adjacent Areas (Baku, 2019). Baku, 2019, pp. 1—5. DOI: 10.3997/2214-4609.201952015.

33. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Sizov O., Kishankov A., Kargina T.* Seyakha catastrophic gas blowout and explosion from the cryosphere of 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>.

34. *Porter C., Morin P., Howat I., Noh M., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K. et al.* ArcticDEM. Harv. Dataverse 2018, 1. DOI: 10.7910/DVN/OHHUKH.

35. Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.6. Agisoft LLC, 2020, 172 p. Available at: www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf.

36. CORONA: America's first satellite program. Ed. K. C. Ruffner. CIA. Washington, 1995, 362 p.

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.

Каргина Татьяна Николаевна, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: tatyana.nik92@gmail.com.

Библиографическое описание данной статьи

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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2022-4-513-523.

MONITORING OF THE MORDYYAKHA GAS EXPLOSION OBJECT DEVELOPMENT ON YAMAL ON THE BASIS OF EARTH REMOTE SENSING DATA

Bogoyavlensky, V. I., Bogoyavlensky, I. V., Nikonov, R. A., Kargina, T. N.

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

The article was received on September 30, 2022

Abstract

The authors carried out a comprehensive study of the Mordyakh object C15 of a catastrophic gas blowout in 2017 using the Earth remote sensing (RS) data from space, including ArcticDEM digital 3D models. According to the remote sensing data, the researchers proved the rapid growth of the perennial heaving mound (PHM) C15 of about 1 m in height during 14.5 months from March 19, 2012 to June 6, 2013 and that in the next four years its growth rate was about 10 cm per year. They determined that in the period from June 8 to June 19, 2017, an explosion occurred in the arch of the PHM with the formation of a crater. As a result of photogrammetric processing of aerial images from a helicopter, the authors developed a highly detailed 3D model of the crater as of August 26, 2020. They recorded the scattering of frozen soil pieces up to a distance of 90 m, and calculated the approximate volume of the largest of them, which was about 40—50 m³. As a result of the research the authors confirmed the endogenous gas-dynamic mechanism of PHM growth followed by powerful blowout and gas explosions with the formation of giant craters. The results contribute to improving the safety of the operation of oil and gas facilities in the Arctic.

Keywords: permafrost, ground ice, perennial heaving mound (PHM), pingo, gas blowout, crater, Earth remote sensing (RS), digital elevation model (DEM), ArcticDEM.

The research was carried out according to the state assignment of the Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences on the topic “Improving the efficiency and environmental safety of the oil and gas resources development in the Arctic and Subarctic zones of the Earth in a changing climate”.

The authors are grateful to the Government of the Yamalo-Nenets Autonomous Area and personally to the Deputy Governor A. V. Mazharov, as well as the Director of the Non-Commercial Partnership “Russian Center for the Arctic Development” A. N. Umnikov for extensive and repeated assistance in organizing expeditionary scientific research in the Arctic.

Information about the authors

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

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

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

Kargina, Tatiana Nikolayevna, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: tatyana.nik92@gmail.com.

Bibliographic description of the article

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. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 12, no. 4, pp. 513—523. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-4-513-523. (In Russian).

© Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kargina T. N., 2022