

## КАТАСТРОФИЧЕСКИЙ ВЫБРОС ГАЗА В 2020 Г. НА ПОЛУОСТРОВЕ ЯМАЛ В АРКТИКЕ. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

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

Статья поступила в редакцию 22 июня 2021 г.

*Выполнено комплексное исследование Бованенковского объекта С17 катастрофического выброса газа в 2020 г. на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). По данным БПЛА впервые построена цифровая 3D-модель полости в массиве подземного льда, в которой развивались газодинамические процессы. Размеры дна полости составляют 14×61,5 м, а ее высота до взрыва – 25–30 м. 3D-модель позволяет проводить исследования в виртуальном пространстве. По данным ДЗЗ из космоса доказан более чем полувековой процесс медленного роста многолетнего бугра пучения (МБП) С17 и установлено, что его взрыв произошел с 28 мая по 9 июня. На основе анализа цифровых моделей рельефа ArcticDEM в период 2011–2017 гг. выявлена неравномерная скорость роста поверхности МБП – в среднем 8 см/год, максимальная – до 20 см/год. Подтверждены сформулированные ранее авторами закономерности формирования в массивах подземного льда газонасыщенных полостей под действием эндогенных процессов, газодинамического роста МБП, мощных выбросов, самовоспламенений и взрывов газа с образованием гигантских кратеров. Результаты позволяют снизить риски возникновения аварийных и катастрофических ситуаций на объектах нефтегазового комплекса в Арктике.*

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

### Введение

Проблема эмиссии парниковых газов в атмосферу очень актуальна в связи с происходящим глобальным потеплением, темпы роста которого значительно увеличились в последние десятилетия, особенно в Арктике [1]. Верхняя часть разреза в криолитосфере, включая толщу многолетнемерзлых пород (ММП), характеризуется высоким уровнем газонасыщенности, что представляет серьезную проблему при бурении и эксплуатации скважин [2–8]. При этом газ может содержаться в коллекторах внутри и под толщей ММП в свободном и гидратном состоянии. Широко распространенная дегазация недр в Арктике имеет форму не только перманентной или периодической эмиссии газа, но нередко характеризуется мощными выбросами газа со дна термокарстовых озер, сопровождающимися образованием подводных кратеров [9–14].

В последние семь лет появилось множество научных статей, посвященных новому направлению исследований мощной эмиссии газа, связанной с катастрофическими выбросами, самовоспламенениями и взрывами газа на севере Западной Сибири в Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО) и в соседних регионах [3–6; 11–13; 15–29]. Особое внимание эти выбросы привлекли тем, что на их месте образуются гигантские кратеры с брустверами из выброшенной породы, диаметр которых достигает 25–40 м, глубина — 40–56 м, а в одном случае даже около 100 м [4–6; 16–19]. При этом разлет кусков мерзлой породы и ледогрунта составляет многие сотни метров при максимальном значении около 900 м [4–6; 16; 17]. По словам очевидцев, в трех случаях выбросов газа были его самовоспламенения и взрывы [4–6]. Очевидно, что мощные выбросы и взрывы газа несут серьезные угрозы жизнедеятельности человека, особенно в районах функционирования нефтегазодобывающих комплексов.

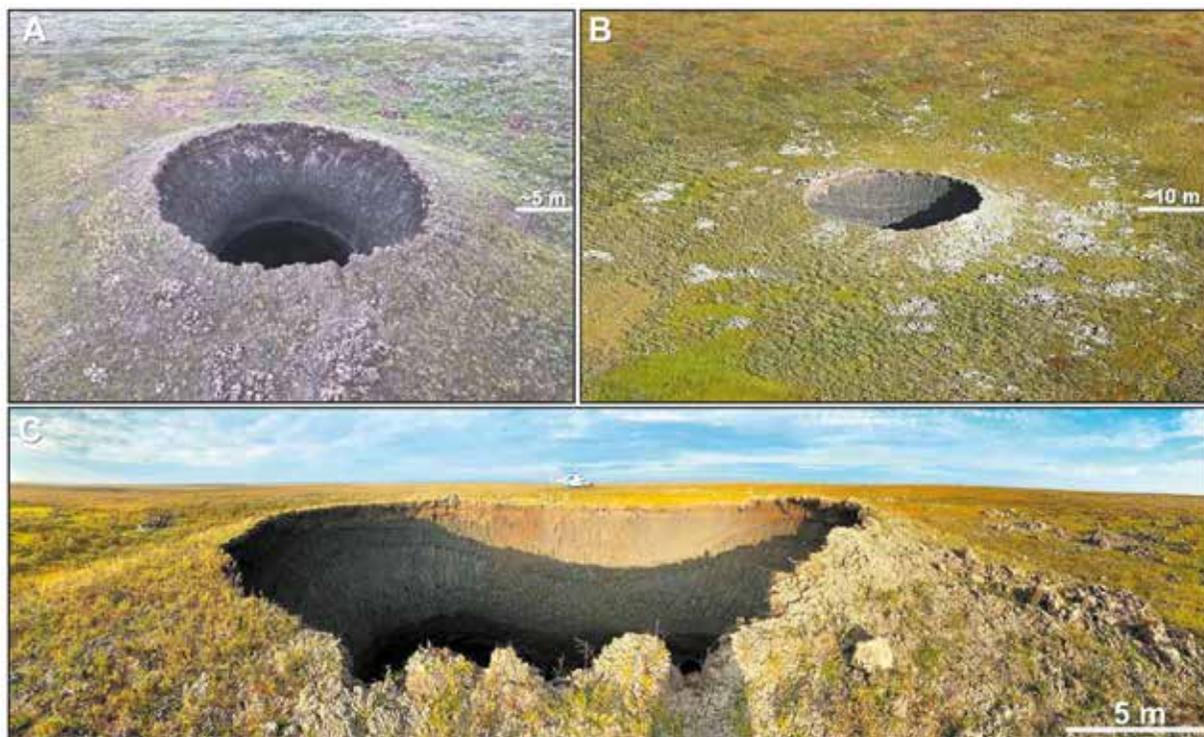


Рис. 1. Вид Бованенковского кратера выброса газа С17 в 2020 г.: А и В — аэрофотоснимки из вертолета 16 июля (А) и 26 августа; панорамный снимок с края кратера 26 августа (С) (фото А — А. Умников, В и С — В. Богоявленский)  
Fig. 1. View of the Bovanenkovo C17 Crater of the gas blowout in 2020: A and B — aerial photographs from a helicopter on July 16 (A) and August 26; panoramic image from the edge of the crater on August 26 (C) (photo A — A. Umnikov, B and C — V. Bogoyavlensky)

В ходе исследований на основе дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса было доказано, что до выбросов и взрывов газа на месте кратеров существовали положительные формы рельефа, подобные широко распространенным в различных регионах Арктики многолетним буграм пучения (МБП) [4—6; 12—28; 30]. Всего по данным ДЗЗ только на одном Ямале по состоянию на 2019 г. было обнаружено 7185 МБП [6; 13], а в настоящее время их количество превысило 7300. Классические МБП, называемые в России булгуньяхи, а в других арктических странах (США, Канаде, Норвегии, Дании) — пинго, имеют криогенный генезис и обычно формируются в низменных частях в котловинах высохших озер — хасыреях или в речных долинах [3; 4; 6; 12; 30]. Однако геоморфологические особенности расположения МБП, на месте которых образовались кратеры, в основном оказались другими — преимущественно это возвышенности и склоны морских террас. Потребовались исследования возможных моделей формирования МБП, а также их газовзрывного разрушения. Различные модели этих процессов были предложены и в разной степени обоснованы в работах ряда ученых [3—6; 11—13; 15—28]. При этом принципиально новой является модель формирования в массивах подземного льда газонасыщенной термокарстовой полости эндогенного генезиса, мерзлый свод которой подвергается вертикальным деформациям

и разрушению под газодинамическим воздействием [4—6; 12—23].

Основной целью данной работы является анализ возможностей комплексного изучения объектов катастрофических выбросов газа в Арктике на основе данных ДЗЗ при аэрокосмических наблюдениях, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Исследования проведены на примере объекта, получившего в ГИС «АМО» индекс С17 и расположенного в центральной части полуострова Ямал вблизи юго-восточного края Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения, содержащего уникальные запасы газа (около 4,9 трлн м<sup>3</sup>).

#### Экспедиционные исследования с БПЛА

Впервые Бованенковский кратер С17 был обнаружен с вертолета директором Некоммерческого партнерства «Российский центр освоения Арктики» (НП «РЦОА») А. Н. Умниковым 16 июля 2020 г. (рис. 1-А) [23]. Во время экспедиционных исследований кратера 26 августа 2020 г., проведенного авторами данной статьи, получен ряд важных результатов, которые отражены в [23]. В частности, было установлено, что в течение короткого времени с 16 июля по 26 августа (40 дней) произошли изменения верхней части кратера С17 — его жерло несколько расширилось, а часть мерзлого грунта с обнажившихся внутренних краев МБП подтаяла и обвалилась внутрь подземной полости (рис. 1-В и 1-С).



Рис. 2. Аэрофотоснимок с БПЛА (А), ортофотоплан (В) и ЦМР (С) в районе кратера С17  
 Fig. 2. Aerial view from UAV (A), orthophoto (B) and DEM (C) in the area of the C17 crater

За прошедший год получено много новых результатов, лишь частично отраженных в [23]. Они представляют большое значение для понимания генезиса катастрофических выбросов газа, а также для выработки методических подходов к комплексной обработке и интерпретации широкого спектра геоинформационных ресурсов, в первую очередь данных ДЗЗ.

Применение ДЗЗ предоставляет уникальную возможность построения трехмерных (3D) цифровых моделей рельефа (ЦМР) на основе фотogramметрической обработки серии космо- или аэрофотоснимков. БПЛА позволяют проводить аэрофотосъемку сверхвысокого разрешения (первые сантиметры) практически по любым заданным маршрутам полета с любым заданным временным интервалом. Кроме того, они позволяют с минимальными финансовыми затратами осуществлять 4D-мониторинг (четвертое измерение — время). Такие исследования были успешно опробованы в 2019—2021 гг. на полигоне карстового провала в Тульской области [31; 32]. В качестве основного БПЛА авторы использовали дрон DJI Mavic Pro (компания DJI, Китай) с камерой Ultra HD «Mavic Pro» высокого разрешения (12,3 Мп) со стабилизатором. Привязка БПЛА осуществляется по навигационным системам GPS и ГЛОНАСС. Построение ЦМР выполнено при фотogramметрической обработке с применением программного обеспечения (ПО) Pix4Dmapper (Pix4D SA, Швейцария), Agisoft Metashape (Geoscan, Россия) [33] и геоинформационно-картографического ПО ArcGIS (ESRI, США). При этом установлено более высокое качество 3D-моделей с применением отечественного ПО.

Приобретенный на тульском полигоне опыт [31; 32] помог провести комплексные исследования Бованенковского объекта катастрофического выброса газа (С17) в 2020 г. На рис. 2-А и 2-В приведен аэрофотоснимок района кратера С17 с высоты 250 м, а на рис. 2-В — ортофотоплан, построенный с применением ПО Agisoft Metashape при обработке серии из 52 аэрофотоснимков с высоты 60 м. На

рис. 2-С представлена результирующая 3D-ЦМР (ПО ArcGIS), на которой дополнительно к цветовой кодировке альтитуд приведены изолинии с шагом 1 м. На ЦМР видны уцелевшие части бугра и стенки кратера в верхней части (до глубины около 11—14 м), а также небольшие объекты, соответствующие растительности (кустарник) и кускам выброшенного грунта, также наблюдаемым на рис. 2-А и 2-В.

Отметим, что на ЦМР рис. 2-С никак не отражены положение реального дна и конфигурация внутреннего строения подземной полости за счет эффекта «черной дыры» (низкая освещенность) и невозможности наблюдения боковых стенок, закрытых для наблюдения сверху частично сохранившимся сводом этой полости (см. рис. 2-А и 2-В). В итоге в ПО ArcGIS было автоматически построено «псевдно» (рис. 2-С), глубина которого почти вдвое меньше глубины фактического дна полости (от 29 до 33 м, минимальная в центре полости), замеренного лазерным дальномером Leica-Rangemaster CRF 2000-В. Это произошло из-за интерполяции по нижним изолиниям наклонных стенок кратера при построении ЦМР в ArcGIS.

Невозможность построения ЦМР пространства подземной полости на первом этапе была спрогнозирована еще при проведении полевой аэрофотосъемки 26 августа. В связи с этим для получения аэрофотоснимков всей подземной полости была проведена специальная дополнительная съемка с БПЛА, направленного в кратер. При этом имелся значительный риск потери аппарата из-за периодически пропадавшей прямой связи дрона с пультом управления, но съемка была выполнена успешно — получен 81 аэрофотоснимок в жерле кратера на глубинах до 15 м ниже уровня земли. По характеру реализации была впервые проведена «подземная аэрофотосъемка» [20; 23].

На втором этапе выполнялась комплексная фотogramметрическая обработка 133 аэрофотоснимков, в том числе 52, сделанных с высоты 60 м над землей, и 81 — из кратера на глубине 10—15 м ниже уровня поверхности земли. Отметим, что при обра-

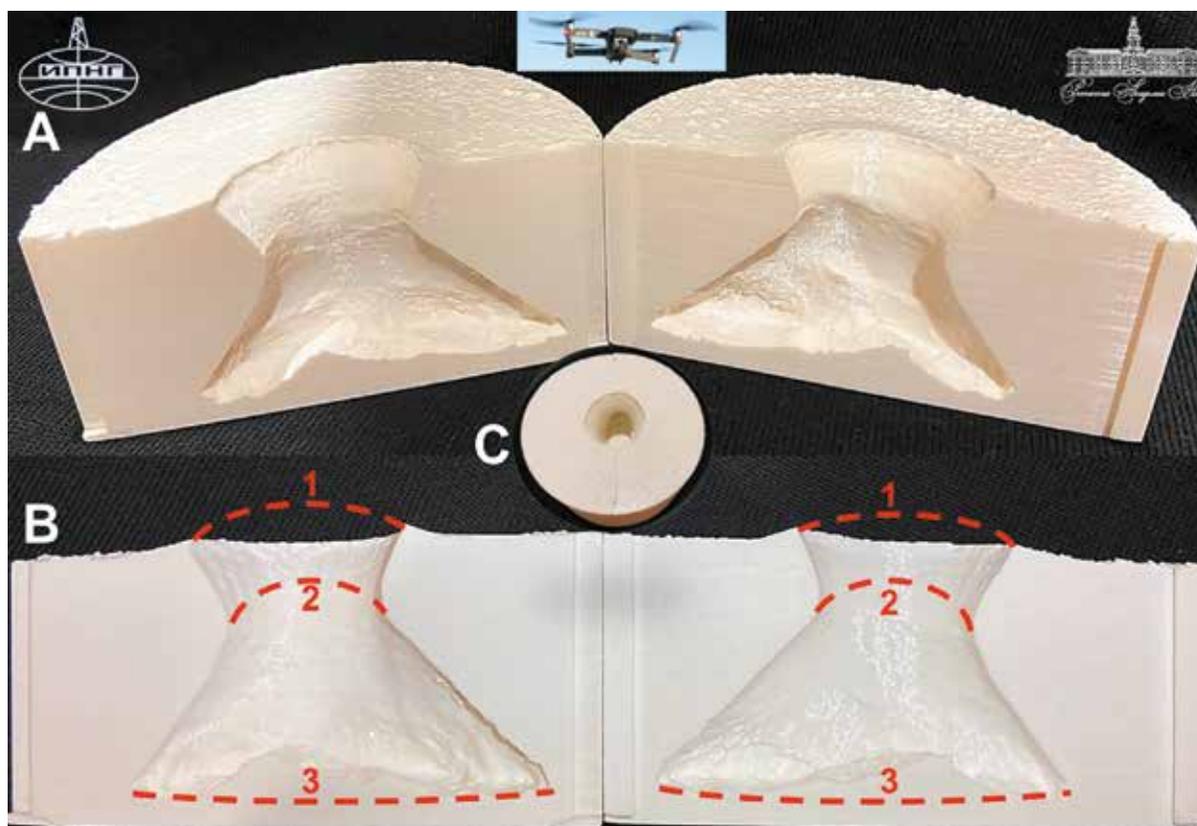


Рис. 3. Физическая 3D-модель подземной полости и кратера выброса газа C17. Обозначения: красный пунктир — схематичное положение границ объекта до взрыва, включая поверхность бугра пучения (1), свод подземной полости (2) и ее дно (3)  
Fig. 3. Physical 3D-model of the underground cavity and the crater of the gas blowout C17. Legend: red dotted line — schematic position of the object's boundaries before the explosion, including the surface of the heaving mound (1), the arch of the underground cavity (2) and its bottom (3)

ботке пришлось отбраковать два аэрофотоснимка из-за ошибок в привязке. Наилучший результат построения 3D-модели был достигнут с применением ПО Agisoft Metashape [20].

На основе достижений «Четвертой промышленной революции» («Индустрия 4.0») по цифровой 3D-модели с помощью аддитивной технологии на 3D-принтере FlyingBear Ghost 4 (FlyingBear, Китай) построен ряд высокоточных физических (натурных) моделей из пластика в масштабах от 1:500 до 1:1000, разделяемых для наглядности на две части. Построенная модель приведена на рис. 3 в трех ракурсах (А, В и С). На рис. 3-В красным пунктиром показано примерное положение границ объекта до взрыва: поверхность бугра пучения (1), свод подземной полости (2) и ее дно (3). При этом видно возвышение дна в центральной части из-за глинистой породы, упавшей сразу после взрыва и в процессе деградации ММП в верхней части стенок кратера.

Расчетный диапазон изменений глубины дна кратера (по вертикали) для разных участков изменяется от 28 до 32 м, размер кратера на поверхности земли — 24×25 м, размер внутреннего жерла кратера эллиптической формы — около 15×18 м. Особый интерес вызывает эллиптическая форма дна кратера 14×61,5 м с субмеридиональной ориентацией глав-

ной оси эллипса по азимуту 350°. С учетом аппроксимации кривыми предполагаемых положений дна и свода полости на 3D-модели (см. рис. 3 — красные пунктирные линии) установлено, что полость до взрыва имела высоту около 25—30 м. В целом объем подземного пространства составил около 10 тыс. м<sup>3</sup>, в том числе в ледовом массиве — около 7,5 тыс. м<sup>3</sup>.

Благодаря применению новых технологий впервые создан высокоточный цифровой двойник подземной полости и кратера выброса газа C17, позволяющий проводить обследование подземного пространства в виртуальной реальности. Полученные результаты способствовали завершению семилетнего периода фундаментальных научных исследований генезиса опасного природного явления мощных выбросов газа в Арктике [4—6; 12—23].

#### Мониторинговые исследования на основе ArcticDEM

Повторные аэрофотосъемки с заданным интервалом времени позволяют строить серии 3D-ЦМР, сопоставление которых на качественном уровне исследований дает представление о происходящих геодинамических процессах (термоденудация берегов морей, рек, озер и участков суши, рост бугров пучения и др.). Автоматизированное сопоставление

Таблица 1. Отклонения высот ЦМР ArcticDEM по стрипам в районе объекта С17

| Спутник | Дата       | Размер, км | Альтитуды ЦМР, м |       | Отклонения, м             |                             |
|---------|------------|------------|------------------|-------|---------------------------|-----------------------------|
|         |            |            | Min              | Max   | вертикальные (от 2017 г.) | горизонтальные (от 2020 г.) |
| WV-2    | 2011.09.11 | 112×16     | -63,9            | 690,5 | -9,93                     | 2,3 на С                    |
| WV-1    | 2013.07.21 | 115×16     | -73,3            | 144,6 | -2,71                     | 2,4 на СЗ                   |
| WV-1    | 2016.06.16 | 114×18     | -49,6            | 347,9 | -3,98                     | 3,0 на ЮВ                   |
| WV-1    | 2017.06.27 | 113×19     | -78,6            | 918,1 | 0,0                       | 3,0 на С                    |

3D-моделей осуществляется с помощью построения разностных моделей 4D, дающих количественные характеристики изменений геометрических размеров изучаемых объектов и позволяющих прогнозировать последующие изменения [20].

В Полярном геопространственном центре PGC (Polar Geospatial Center, www.pgc.umn.edu) Университета Миннесоты на основе фотограмметрической обработки космических снимков (КС) WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3 (WV-1, WV-2, WV-3) и GeoEye-1 созданы ЦМР ArcticDEM с разрешением 2 м [34]. На основе доступных стрипов (strips — полосы пролета спутников) ЦМР PGC возникли новые возможности построения 3D-4D-моделей развития опасных объектов в 2011—2017 гг., реализованные в работах [13; 18; 20]. При этом в [20] подробно описаны особенности подготовки входных данных ЦМР ArcticDEM и результаты их использования для мониторинга изменений двух объектов мощных выбросов (взрывов) газа: Бованенковского С1 и Сеяхинского С11. Ниже приведены результаты подобных исследований применительно к объекту С17.

Для объекта С17 из доступных 9 стрипов ЦМР 2011—2017 гг. были выбраны 4, характеристика которых приведена в табл. 1. При формировании фрагментов ЦМР с центром в своде МБП С17, приведенных на рис. 4-Е (Elevation), все стрипы были подвергнуты коррекции по вертикали и горизонтали, так как они обладали взаимной несогласованностью, а также пространственными сдвигами относительно высоточных данных БПЛА, вызванных погрешностью фотограмметрической обработки и координатной привязки. Относительно ЦМР 2017 г. погрешности изменялись от -9,93 м (2011 г.) до -2,71 м (2013 г.). Также были выявлены горизонтальные смещения в 2,3—3,0 м (см. табл. 1). Кроме того, в ЦМР исходных стрипов были выявлены локальные артефакты с отрицательными и положительными высотами (от -78,6 до +918,1 м), чего быть не может, так как высотности рельефа Ямала не превышают 90 м и не могут быть отрицательными. Подобные погрешности и артефакты были обнаружены и в ЦМР стрипов, обработанных ранее по ряду других объектов [20]. Отметим, что артефакты преимущественно образуются из-за известной проблемы фотограмметрической обработки при расчетах ЦМР для поверхностей во-

доемов, которые для устранения проблемных мест обычно вырезаются, но частично остаются не устраненными. В итоге коррекции ЦМР по объекту С17 были достаточно хорошо согласованы, что видно на рис. 5-Е, представляющем разрезы по профилю А-А' (положение показано на рис. 4).

В связи с отсутствием ЦМР в базе данных PGC объекта С17 после взрыва МБП для отображения его катастрофических изменений в 2020 г. ряд из четырех моделей 2011—2017 гг. (рис. 4-Е) был дополнен ЦМР кратера, построенной в 2020 г. по данным БПЛА с высоты полета 60 м (см. рис. 2-С). Отметим, что из космоса могло быть получено изображение кратера с эффектом «черной дыры», подобное рис. 2-А, но с более низким разрешением (в 10 и более раз).

Наличие приведенных к единому уровню 3D-ЦМР (см. рис. 4-Е) позволяет проводить анализ изменений изучаемого объекта в течение заданного периода (например, через несколько месяцев или лет) на качественном и количественном уровнях. В этом случае делается вычитание разновременных ЦМР в любых комбинациях по датам съемки. Отметим, что подобные процедуры давно применяются в сейсморазведке для 4D-мониторинга разработки месторождений нефти и газа [4; 41] и были применены ранее при мониторинге изменений Бованенковского С1, Сеяхинского С11 и ряда других объектов исследований [20].

На рис. 4-D1 и 4-D2 приведены рассчитанные в ПО ArcGIS разностные (Difference) ЦМР по объекту С17 для пяти лет (2011—2020 гг.) по сравнению с 2011 г. (рис. 4-D1) и синтезированной (X) ЦМР. Последняя была сформирована после расчета изолиний по входным дискретным данным ЦМР 2011 г. в пикселях, выявления и устранения всех замкнутых изолиний, ооконтуривающих МБП, и коррекции изолиний, искаженных его влиянием, с последующим пересчетом в дискретную ЦМР (рис. 4-D2). Таким образом, синтезированная ЦМР (X) представляет собой модель региональной составляющей по состоянию до начала роста бугра пучения. Соответствующие разностные разрезы по профилю А-А' приведены на рис. 5-D. Разностные ЦМР отображают прирост МБП в 2013, 2016 и 2017 гг. (рис. 4-D1) и изменения конфигурации самого МБП с устранен-

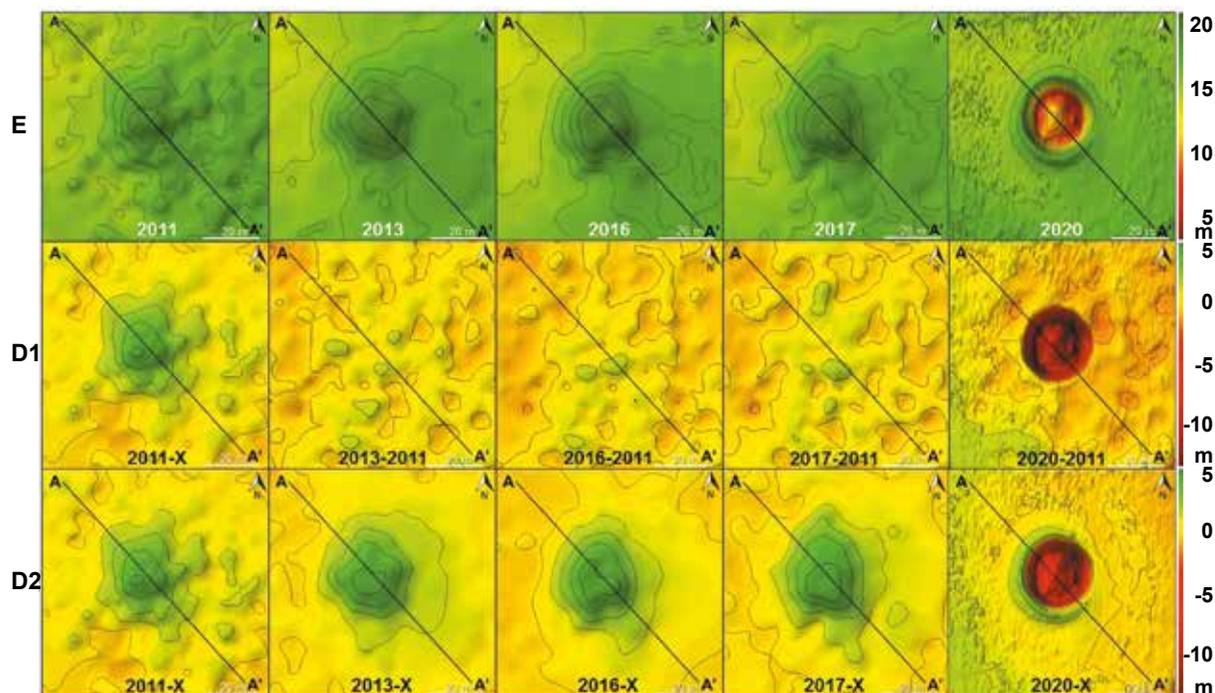


Рис. 4. Результаты 4D-мониторинга Бованенковского объекта С17 по данным ДЗЗ из космоса – ArcticDEM (2011–2017 гг.) и БПЛА (2020 г.): ЦМР (Е), различия ЦМР по годам по сравнению с 2011 г. (D1), различия ЦМР бугра пучения (D2).

Примечания: 1. Конкретные даты ЦМР приведены в табл. 1. 2. А-А' – положения разрезов, приведенных на рис. 5  
Fig. 4. Results of 4D monitoring of the Bovanenkovskoye object C17 according to remote sensing data from space – ArcticDEM (2011–2017) and UAV (2020): DEM (E), differences in DEM by years compared to 2011 (D1), differences in DEM for heaving mounds (D2).  
Notes: 1: Specific dates of the DEM are given in table 1. 2. A-A' – the positions of the cross sections shown in Fig. 5

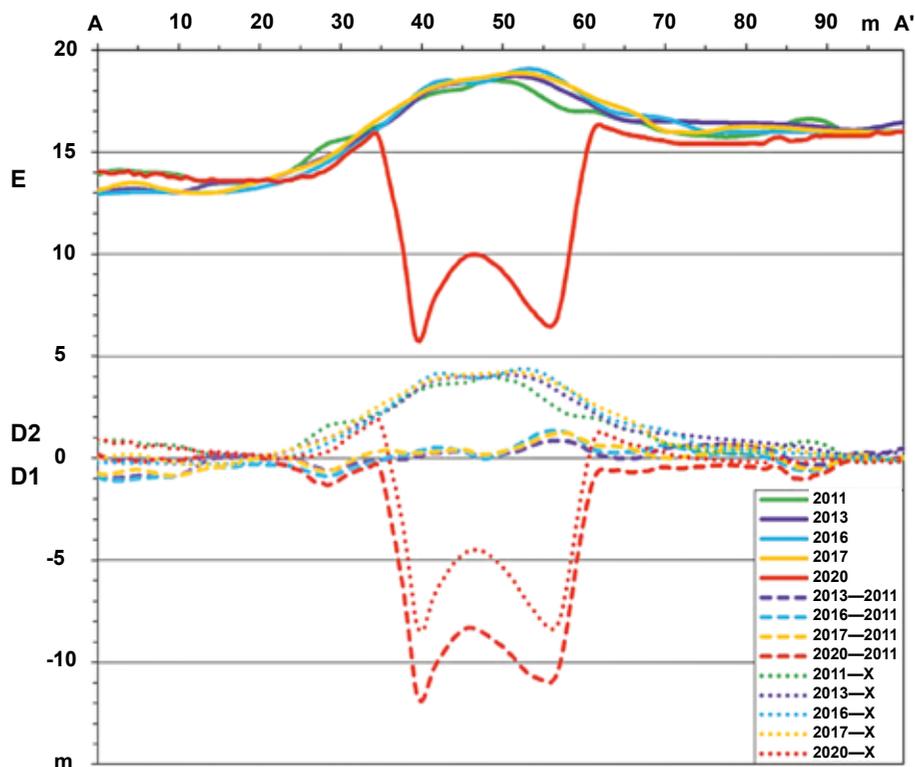


Рис. 5. 2D-мониторинг Бованенковского объекта С17 по данным ДЗЗ из космоса – ArcticDEM (2011–2017 гг.) и БПЛА (2020 г.), построенные по профилю А-А', показанному на рис. 4.

Примечание. Е – альтитуды рельефа, D1 и D2 – различия (см. рис. 4 – D1 и D2)

Fig. 5. 2D monitoring of the Bovanenkovskoye object C17 according to RS data from space – ArcticDEM (2011–2017) and UAV (2020), conducted along the A-A' line shown in Fig. 4.

Note. E – Elevation, D1 and D2 – Differences (see Fig. 4 – D1 and D2)

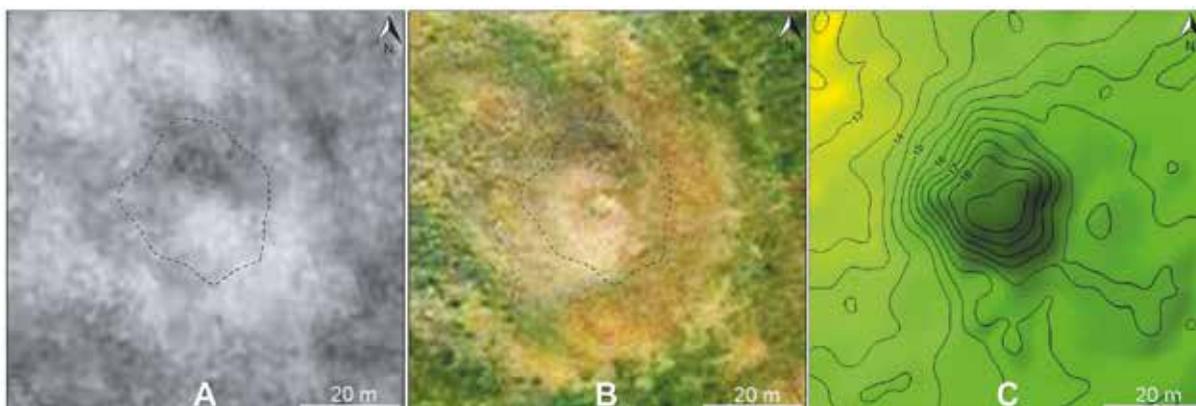


Рис. 6. Космоснимки бугра пучения на объекте С17 со спутников КН-4А 29 сентября 1969 г. (А) и WV-2 21 июля 2013 г. (В) с дополнением ЦМР ArcticDEM (С)  
 Fig. 6. Satellite images of the heaving mound at the C17 object from satellites КН-4А on September 29, 1969 (А) and WV-2 on July 21, 2013 (В) with the addition of the ArcticDEM (С)

ным влиянием рельефа (рис. 4-D2). Расчетная высота бугра по состоянию на 2017 г. с учетом устранения влияния склона морской террасы составила около 4 м (рис. 4-D и 5-D).

Согласно расчетам ЦМР за шестилетний период (2011—2017 гг.), поверхность МБП поднималась неравномерно. Максимальный рост в отдельных частях МБП достиг 1,2 м (скорость роста около 20 см/год), а в среднем — около 0,5 м (скорость 8 см/год).

#### Анализ возраста бугра пучения и определение даты взрыва

Для уточнения возраста МБП самыми ранними из доступных являются космические снимки американских военных спутников Keyhole («Замочная скважина»), запущавшихся в 1959—1972 гг. для съемки поверхности Земли (в основном территории СССР и Китая) по засекреченной программе ЦРУ CORONA с разведывательными целями [35]. Всего было запущено 127 (94 успешных) аппаратов четырех основных версий (в 1959—1960 гг. — КН-1, в 1960—1961 гг. — КН-2, в 1961—1962 гг. — КН-3 и в 1962—1972 гг. — КН-4) с различными модификациями, при этом разрешение КС изменялось от 12 м до 1,8—2,7 м. По данным [35], две другие системы (КН-5 и КН-6) оказались менее успешными. С 1995 г. КС программы CORONA доступны в Центре данных Системы наблюдения за ресурсами Земли (EROS) Геологической службы США (USGS), а в 2002 г. были рассекречены КС спутников КН-7 и КН-9 (GAMBIT). КС программы CORONA позволяют выполнять ретроспективный анализ наземной обстановки более чем полувековой давности, что особенно важно для анализа состояния территорий Арктики до промышленного освоения [36].

Для объекта С17 рассмотрены три КС программы CORONA: КН-2 7 июля 1961 г., КН-4А 26 июня 1967 г. и 29 сентября 1969 г., из которых первые два КС оказались малоинформативными из-за невысокого разрешения (КН-2) и качества (КН-4А). На рис. 6-А и 6-В приведено сопоставление КС объекта С17 со спут-

ников КН-4А (разрешение 2,7 м) 29 сентября 1969 г. и WV-2 (разрешение 0,5 м) 21 июля 2013 г. Пунктирной линией показаны контуры МБП, снятые с практически замкнутой изолинии 16,5 м, выделенной на ЦМР ArcticDEM (рис. 6-С), построенной в ПО ArcGIS на основе фотограмметрической обработки КС WV-2 рис. 6-В (разрешение 2 м) в PGC. Несмотря на разное качество изображений рис. 6-А и 6-В, можно сделать вывод, что МБП уже существовал в 1969 г., т. е. его возраст существенно превышает 52 года.

Более чем полувековая история развития МБП Бованенковского объекта С17 принципиально важна, так как свидетельствует, что МБП газодинамического генезиса могут иметь не только быстрый рост (годы), предшествующий взрыву (например, как на Сеяхинском объекте С11 [18; 22]), но и длительный период развития (многие десятки, возможно, даже сотни лет), подобный классическим МБП криогенного генезиса (булгунняхи-пинго).

Определение даты взрыва с формированием кратера и возраста МБП возможно на основе анализа ретроспективных данных ДЗЗ КС с различных космических аппаратов. Для этих целей доступен широкий спектр КС последних десятилетий, сделанных с зарубежных (Sentinel, Landsat, PlanetScore и др.), а также отечественных («Ресурс-П» и «Канопус-В») аппаратов. Для примера на рис. 7 приведены восемь КС (размер фрагментов 440×440 м) высокого пространственного разрешения (0,8—2 м), включая «Ресурс-П1», «БКА» (Белорусский космический аппарат) от 5 июля 2017 г. и «Канопус-В» (№ 4, 6, ИК). По этим КС видно, что наиболее четко МБП выделяется в зимнее время по эффекту яркого освещения и затемнения его противоположных сторон, что позволяет идентифицировать эти объекты с высокой надежностью, в том числе на автоматизированной основе распознавания образов [13; 20; 37]. К сожалению, в настоящее время космосъемка в Арктике с отечественных аппаратов не является высокочастотной, доступно лишь ограниченное количество КС, не позволяющее сузить временной диапазон взрыва МБП С17.

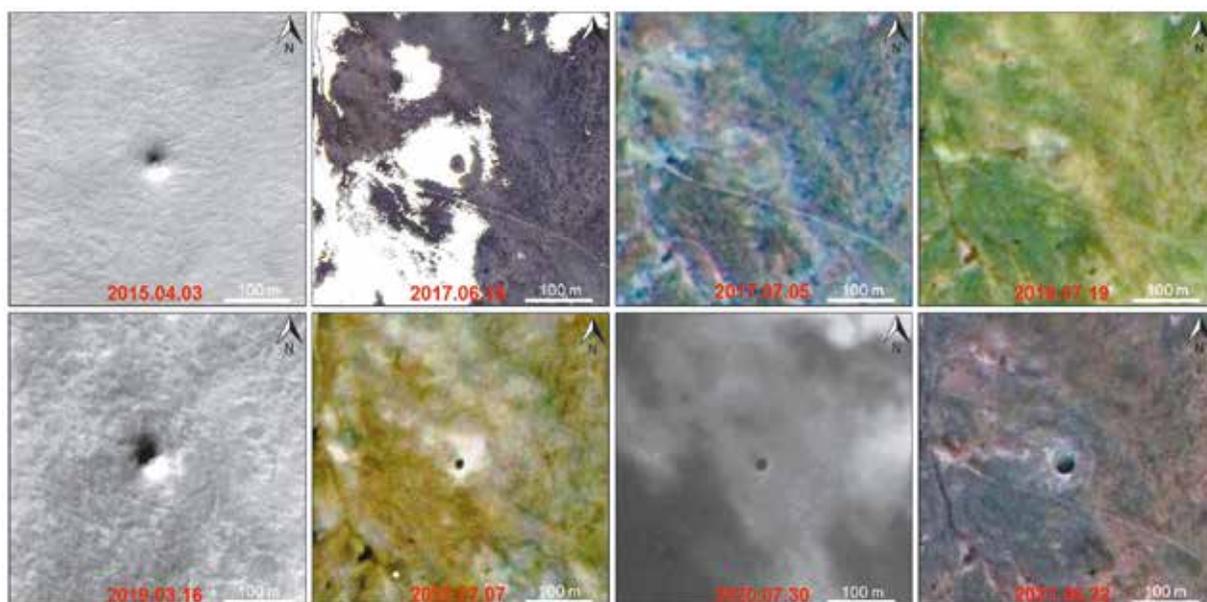


Рис. 7. Мониторинг состояния объекта С17 по космоснимкам со спутников «Ресурс-П1» (3 апреля 2015 г. и 16 июня 2017 г.), «БКА» (5 июля 2017 г.) и «Канопус-В» (с 19 июля 2018 г. по 22 июня 2021 г.)  
Fig. 7. Monitoring of the object C17 state by images from the satellites Resurs-P1 (April 3, 2015 and June 16, 2017), BKA (July 5, 2017) and Kanopus-V (from July 19, 2018 to June 22, 2021)

Для определения даты взрыва МБП наиболее информативными и доступными являются высокопериодичные КС Sentinel-2A и Sentinel-2B, позволяющие выполнять оперативный космический мониторинг наземной обстановки, включая изменения ландшафта с разрешением 10 м. На рис. 8 приведена выборка 16 из 56 безоблачных КС Sentinel из 292 КС, доступных в период с 15 сентября 2019 г. по 2 июля 2021 г. (облачность около 81% дней съемки). Целевой объект исследований уверенно идентифицируется в виде МБП на ряде летних и зимних КС в период 15 сентября 2019 г. — 28 мая 2020 г. и в виде кратера — с 9 июня 2020 г. Таким образом, дата выброса газа однозначно ограничена периодом 28 мая — 9 июня. К недостаткам КС Sentinel-2 можно отнести невысокое разрешение, которое, однако, лучше, чем у КС Landsat-8 (15 м).

### Обсуждение результатов дистанционных исследований

Исследованный Бованенковский объект выброса газа С17 предоставил уникальную возможность получить особо важную информацию, дополняющую результаты исследований генезиса мощных (взрывных) выбросов газа в Арктике. По состоянию на 26 августа 2020 г. подземная полость, образовавшаяся в массиве подземного льда мощностью свыше 20 м, была практически не затоплена водой, имела хорошую сохранность значительной части свода, кратера и стенок сложной формы. Выброс газа с образованием кратера С17 произошел через центральную (сводовую) часть МБП, образовавшегося на склоне третьей морской террасы. В связи с этим данный МБП нельзя относить к классическим буграм пучения криогенного генезиса (булгуньяхи-

пинго). Его рост, продолжавшийся более 52 лет, обусловлен газодинамическим процессом.

Продолговатая форма подземной полости, дно которой можно аппроксимировать эллипсом с главными осями 61,5 и 14 м (коэффициент сжатия 0,228), и специфические черты строения стен полости дают основание предположить, что первоначально в ледовом массиве формировалась не одна полость, а как минимум две. По мере увеличения размеров эти полости объединились в единое подземное пространство. Большая ось эллипса имеет ориентацию на NNW по азимуту 350°, что близко к азимутам глубинных разломов, выявленных по данным сейсморазведки в юрско-меловом комплексе (в основном  $353 \pm 6^\circ$ ), а также азимуту  $342 \pm 1^\circ$  основной оси антиклинальной складки Бованенковского месторождения по кровле продуктивной залежи сеномана [38]. Также отметим, что коэффициент сжатия эллипса, аппроксимирующего контур залежи сеномана, составляет  $0,35 \pm 0,01$ .

По данным ДЗЗ (рис. 7 и 8), за летний сезон 2020 г. осредненный диаметр жерла кратера («черная дыра») увеличился в два раза — примерно с 11,5 м (7 июля 2020 г.) до 23 м (9 октября 2020 г.), а по состоянию на 22 июня 2021 г. он достиг 29 м. Такие высокие темпы термоденудационных процессов с катастрофическим изменением ландшафта обусловлены быстрым таянием (плавлением) массива подземного льда, в котором первоначально образовалась термокарстовая полость. Очевидно, что ее глубина при этом существенно уменьшилась за счет оттаявшей и упавшей породы. Подобные быстрые процессы ранее наблюдались на ряде других объектов исследований, в частности на Сеяхинском кратере выброса газа С11.

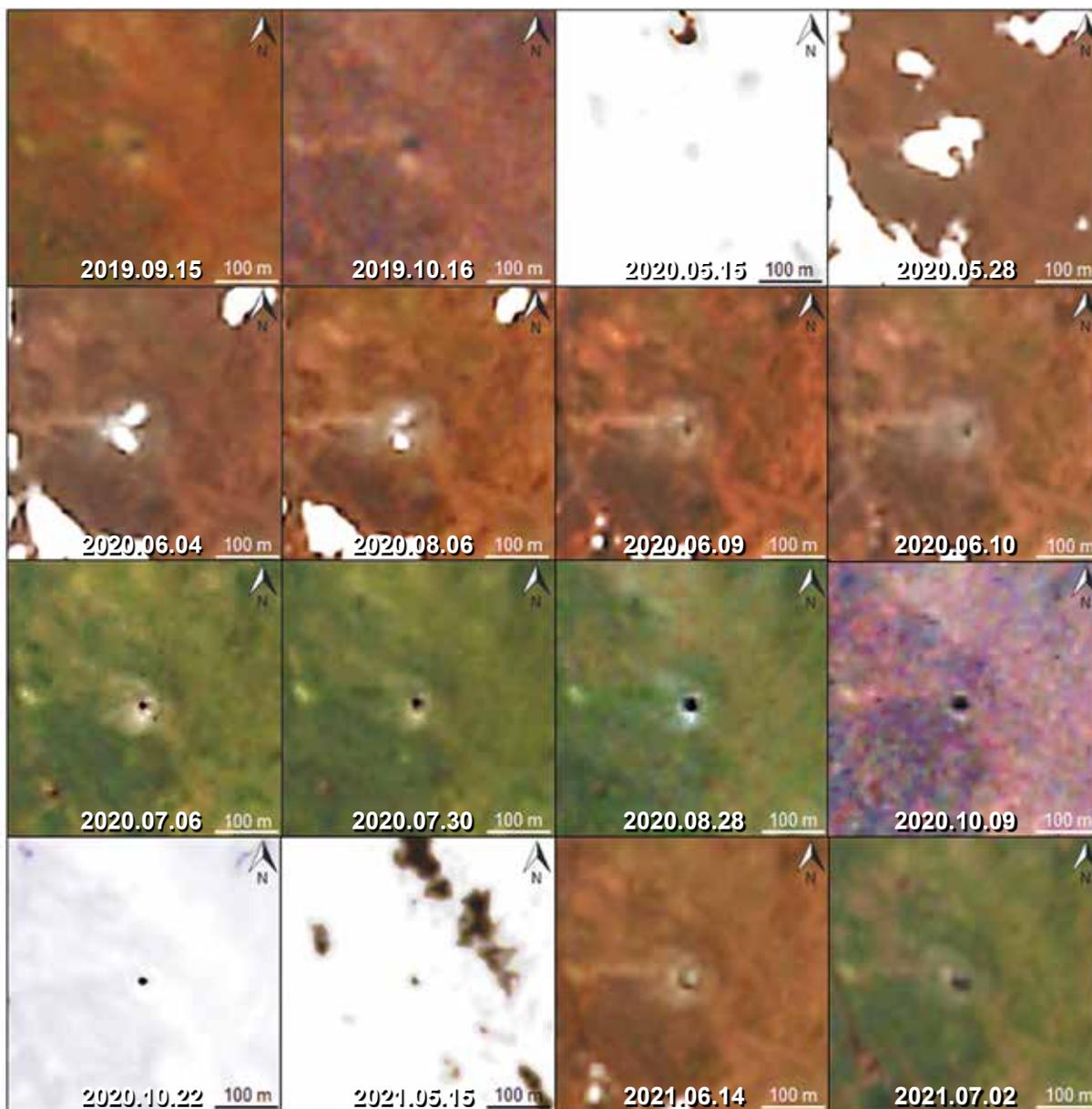


Рис. 8. Мониторинг состояния объекта C17 по космоснимкам со спутников Sentinel-2A и Sentinel-2B в 2019–2021 гг.  
 Fig. 8. Monitoring of the object C17 state by images from the satellites Sentinel-2A and Sentinel-2B in 2019–2021

Разностные ЦМР позволяют в полуавтоматическом режиме выявлять изменения в рельефе местности, связанные с деградацией ММП и особенно с формированием кратеров при катастрофических выбросах газа [20]. Нам представляется, что этот подход надежнее, чем предложенный в [29]. Однако очевидно, что наилучший результат достижим на основе комплексирования разных технологий.

Отметим, что общей проблемой мониторинга состояния объектов в Арктике в оптическом диапазоне частот является частая облачность, а доступные радиолокационные снимки имеют недостаточное разрешение. Поэтому точную дату события можно определить лишь в исключительных случаях. Очевидно, что наиболее точное определение даты

взрыва МБП может быть достигнуто максимально полным использованием всех доступных КС.

### Заключение

Впервые в Арктике в верхней части ММП был обнаружен кратер выброса газа в своде хорошо сохранившейся крупной полости, сформировавшейся в массиве подземного льда. Оперативное проведение полевых исследований с применением современных методов трехмерной съемки позволило впервые провести аэрофотосъемку с БПЛА внутреннего строения этой полости («подземную аэрофотосъемку»). В итоге фотограмметрической обработки построена цифровая 3D-модель практически не измененной полости, в которой происходили накопле-

ние газа и развитие газодинамических процессов. Размеры дна полости составляют 14×61,5 м, а ее высота до взрыва — 25—30 м. Получены уникальные трехмерные данные, позволяющие проводить исследования в виртуальном пространстве полости и ограничивающих ее конфигурацию подземного льда и ММП.

Комплексный ретроспективный анализ данных ДЗЗ из космоса позволил установить длительный (более чем полувековой) процесс формирования МБП, образовавшегося на склоне третьей морской террасы. На основе данных ДЗЗ по цифровым моделям ArcticDEM и БПЛА построен комплекс 3D-4D-моделей. Исследованы размеры и динамика роста МБП в 2011—2017 гг. (максимальная скорость роста — около 20 см/год, средняя — около 8 см/год). Установлен период взрыва МБП — с 28 мая по 9 июня 2020 г.

Полученные результаты исследования Бованенковского объекта выброса газа С17 подтверждают сформулированные и обоснованные авторами в 2014—2021 гг. [4—6; 12—23; 37] закономерности формирования опасных газонасыщенных полостей в криолитосфере Земли в массивах подземного льда под действием эндогенных процессов, газодинамического роста бугров пучения, мощных выбросов, самовоспламенений и взрывов газа с образованием гигантских кратеров. Это значительно повышает уровень изученности нового опасного явления в Арктике и позволяет снизить риски возникновения аварийных и катастрофических ситуаций на объектах нефтегазового комплекса.

Работа выполнена по госзаданию Института проблем нефти и газа РАН по теме «Рациональное природопользование и эффективное освоение нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли» (№ АААА-А19-119021590079-6). Авторы признательны Правительству ЯНАО и НП «Российский центр освоения Арктики» за поддержку полевых исследований.

### Литература/References

1. Saunois M., Stavert A. R., Poulter B. et al. The Global Methane Budget 2000—2017. *Earth Syst. Sci. Data*, 2020, 12, pp. 1561—1623. DOI: 10.5194/essd-12-1561-2020.
2. Арэ Ф. Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли. — 1998. — Т. 2, № 4. — С. 42—50.
3. Баду Ю. Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи. — М.: Науч. мир, 2018. — 232 с.
4. 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, Nauch. mir, 2018, 232 p. (In Russian).

4. Богоявленский В. И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов: Монография // Тр. Вольного экон. о-ва. — 2014. — Т. 182, № 3. — С. 12—175.

*Bogoyavlensky V. I. Arctic and the World Ocean: Current State, Perspectives and Challenges of Hydrocarbon Production. Tr. Volnogo ekon. o-va*, 2014, vol. 182, no. 3, pp. 12—175. (In Russian).

5. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Гор. пром-сть. — 2020. — № 1. — С. 97—118. — DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118.

*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).

6. 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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-51-66.

*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).

7. Чувиллин Е. М., Якушев В. С., Перлова У. М., Кондаков В. В. Газовая компонента толщ мерзлых пород в пределах Бованенковского газоконденсатного месторождения (п-в Ямал) // Докл. РАН. — 1999. — 369 (4). — С. 522—524.

*Chuvililn E. M., Yakushev V. S., Perlova U. M., Kondakov V. V. Gas component of frozen rock strata within the Bovanenkovo gas condensate field (Yamal Peninsula). Dokl. RAN*, 1999, 369 (4), pp. 522—524. (In Russian).

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

*Yakushev V. S. Natural Gas and Gas Hydrates in Cryolithozone. Moscow, VNIIGAZ*, 2009, 192 p. (In Russian).

9. Кругликов Н. М., Кузин И. Л. Выходы глубинного газа на Уренгойском месторождении // Структурная геоморфология и неотектоника Западной Сибири в связи с нефтегазоносностью. — Тюмень, 1973. — С. 96—106. — (Тр. ЗапСибНИГНИ; вып. 3).

*Kruglikov N. M., Kuzin I. L. Outcrops of deep gas at the Urengoyskoye field. Structural geomorphology and neotectonics of Western Siberia in connection with oil and gas potential. Proc. ZapSibNIGNI*, 1973, iss. 3, pp. 96—106. (In Russian).

10. Walter K. M., Zimov S., Chanton J. P., Verbyla D., Chapin III F. S. Methane bubbling from Siberian thaw lakes

as a positive feedback to climate warming. *Nature*, 2006, 443, pp. 71—75. DOI: 10.1038/nature05040.

11. Бондур В. Г., Кузнецова Т. В. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исследования Земли из космоса. — 2015. — № 4. — С. 30—43. — DOI: 10.7868/S020596141504003X.

Bondur V. G., Kuznetsova T. V. Detecting Gas Seeps in Arctic Water Areas Using Remote Sensing Data. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2015, vol. 51, no. 9, pp. 1060—1072. DOI: 10.1134/S0001433815090066.

12. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования выбросов газа на термокарстовых озерах // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 2 (34). — С. 31—47. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47.

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

13. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — С. 52—68. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68.

Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kargina T. N. Earth degassing in the Arctic: Comprehensive studies of the distribution of frost mounds and thermokarst lakes with gas blowout craters on the Yamal peninsula. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2019, no. 4 (36), pp. 52—68. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68. (In Russian).

14. Богоявленский В. И., Ерохин Г. Н., Никонов Р. А. и др. Изучение зон катастрофических выбросов газа в Арктике на основе пассивного микросейсмического мониторинга (на примере озера Открытие) // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 1 (37). — С. 93—104. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-93-104.

Bogoyavlensky V. I., Erokhin G. N., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V., Bryksin V. M. Study of catastrophic gas blowout zones in the Arctic based on passive microseismic monitoring (on the example of Lake Otkrytiye). *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2020, no. 1 (37), pp. 93—104. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-93-104. (In Russian).

15. Bogoyavlensky V. I., Yerokhin G. N., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V., Bryksin V. M. Passive seismic monitoring study of the Earth degassing in the Arctic. *EAGE, Geomodel 2020*, Sep 2020, vol. 2020, pp. 1—5. Available at: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202050102>.

16. 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 form the Arctic cryolithozone. *Yamal craters. Oil and Drilling*, 2014, no. 9, pp. 13—18. (In Russian).

17. 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 form the Arctic cryolithozone. *Yamal and Taymyr craters. Pt. 2. Oil and Drilling*, 2014, no. 10, pp. 4—8. (In Russian).

18. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Мажаров А. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сейяхинского выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 1 (33). — С. 88—105. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105.

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. 80—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105. (In Russian).

19. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: генезис природной и антропогенной эмиссии метана // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 3 (39). — С. 6—22. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-6-22.

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

20. 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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-90-105.

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).

21. Bogoyavlensky V. Gas Blowouts on the Yamal and Gydan Peninsulas // *GeoExPro* [London], 2015, vol. 12, no. 5, pp. 74—78.

22. 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>.
23. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Kargina T., Chuvilin 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, p. 20. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences11020071>.
24. Leibman M. O., Kizyakov A. I., Plekhanov A. V., Strelt'skaya 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.
25. 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.
26. Оленченко В. В., Синицкий А. И., Антонов Е. Ю., Ельцов И. Н., Кушнарченко О. Н., Плотников А. Е., Потопов 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., Eпов 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).
27. Сизов О. С. Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений 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).
28. Chuvilin E., Sokolova N., Davletshina D., Bukhanov B. et al. Conceptual models of gas accumulation in the shallow permafrost of Northern West Siberia and conditions for explosive gas emissions. *Geosciences*, 2020, 10, 195. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences10050195>.
29. 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>.
30. 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.
31. Bogoyavlensky I. V. Perspectives of implementing remote methods for geocological tasks with creating 3D models. Third International Conference on Geology of the Caspian Sea and Adjacent Areas (Baku, 2019), 2019, pp. 1—5. DOI: 10.3997/2214-4609.201952014.
32. Bogoyavlensky I. V. Results of changes monitoring in the Tula karst sinkhole based on remote sensing from an unmanned aerial vehicle. *EAGE Geomodel 2020*, 2020, pp. 1—5. DOI: 10.3997/2214-4609.202050100.
33. 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](http://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf).
34. Porter C., Morin P., Howat I., Noh M., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K. et al. ArcticDEM. *Harv. Dataverse* 2018, 1. DOI: 10.7910/DVN/OHHUKH.
35. CORONA: America's first satellite program. Ed. K. C. Ruffner. CIA. Washington, 1995. — 362 p.
36. Grosse G., Schirrmeister L., Kunitsky V. V., Hubberten H.-W. The Use of CORONA Images in Remote Sensing of Periglacial Geomorphology: An Illustration from the NE Siberian Coast. *Permafrost and Periglac. Process*, 2005, 16, pp. 163—172. DOI: 10.1002/ppp.509.
37. 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). 2019, pp. 1—5. DOI: 10.3997/2214-4609.201952015.
38. 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.

### 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@pgc.su.

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

**Каргина Татьяна Николаевна**, младший 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., 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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-362-374.

## CATASTROPHIC GAS BLOWOUT IN 2020 ON THE YAMAL PENINSULA IN THE ARCTIC. RESULTS OF COMPREHENSIVE ANALYSIS OF AEROSPACE RS DATA

Bogoyavlensky, V. I., Bogoyavlensky, I. V., Kargina, T. N.

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

The article was received on June 22, 2021

### Abstract

The researchers carried out comprehensive study of the Bovanenkovo C17 object of a catastrophic gas blowout in 2020 based on RS data from space and using UAV. For the first time, based on the UAV data, they created a digital 3D model of a cavity in a ground ice massif, in which gas-dynamic processes developed. The dimensions of the cavity bottom are 14×61.5 m, and its height before the explosion was 25-30 m. The 3D model allows research in virtual space. According to RS data from space, the researchers have proved more than half a century of slow growth of the perennial heaving mound (PHM) C17 and established that its explosion occurred from May 28 to June 9. Based on the analysis of digital elevation models (DEM) ArcticDEM in the period of 2011-2017 they revealed an uneven growth rate of the PHM surface — on average 8 cm/year, maximum up to 20 cm/year. The scientists confirmed the formation features of gas-saturated cavities in the massifs of ground ice under the influence of endogenous processes, gas-dynamic growth of PHMs, powerful blowouts, self-ignitions and explosions of gas with the formation of giant craters. The results make it possible to reduce the risks of emergencies and catastrophic situations at the facilities of the oil and gas industry in the Arctic.

**Keywords:** permafrost, underground ice, perennial heaving mound (PHM), pingo, cavity, gas blowout, crater, Earth remote sensing (ERS), unmanned aerial vehicle (UAV), digital elevation model (DEM), ArcticDEM.

The research was conducted according to the state assignment on the topic “Rational nature management and effective development of oil and gas resources of the Arctic and Sub-Arctic zones of the Earth” (No. AAAA-A19-119021590079-6).

The authors are grateful: to the Russian Academy of Sciences and the Government of the Yamalo-Nenets Autonomous District for continuous support of scientific research in the Arctic; to PJSC NOVATEK and OJSC Yamal LNG for their extensive and repeated assistance in organizing field studies; to PJSC Gazprom for assistance in scientific research.

---

### Information about the authors

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

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

**Kargina, Tatiana Nikolayevna**, Junior 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., 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).

© Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N., 2021