

## ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ВЫЯВЛЕНИЯ И МОНИТОРИНГА РАЗВИТИЯ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ И КРАТЕРОВ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ВЫБРОСОВ ГАЗА В АРКТИКЕ

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

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2020 г.

*В ходе трехлетней работы в Арктике с цифровыми моделями рельефа (ЦМР) ArcticDEM получены принципиально новые результаты о природных катастрофических трансформациях ландшафтов полуострова Ямал в процессе мощных выбросов и взрывов газа. Доказана возможность выявления газозрывоопасных объектов и процессов в ходе регионального 4D-мониторинга на основе обработки ЦМР. При проведении ретроспективного 4D-мониторинга выявлен ряд объектов потенциальных выбросов газа. Выявлены недостатки и показана необходимость дальнейшего совершенствования ЦМР ArcticDEM. Построены 3D-модели районов катастрофических техногенных выбросов газа при бурении поисково-разведочных скважин в Арктике, включая Кумжинское месторождение. С помощью беспилотного летательного аппарата (дрона DJI Mavic Pro) проведены аэрофотосъемки и построены 3D-модели ряда кратеров выбросов газа. На Ямале впервые выполнена подземная аэрофотосъемка пространства кратера выброса газа С17, свидетельствующая о существовании до взрыва газонасыщенной полости в массиве подземного льда, что дополнительно подтверждает модель газодинамического механизма, предложенную авторами в 2014 г.*

**Ключевые слова:** Арктика, многолетнемерзлые породы, криосфера, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), космоснимки, аэрофотосъемка, беспилотный летательный аппарат, цифровые модели рельефа (ЦМР), 4D-мониторинг, многолетние бугры пучения, термокарстовые озера, газонасыщенные полости, кратеры выбросов газа, газодинамический механизм.

### Введение

В «Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года», утвержденных в 2020 г. указом Президента РФ, среди семи основных угроз национальной безопасности в Арктике отмечена «неготовность системы мониторинга окружающей среды, размещенной в Арктической зоне Российской Федерации, к экологическим вызовам» [1, п. 7.ж]. Необъятные просторы малоосвоенных территорий суши и акваторий Арктики диктуют необходимость широкого применения аэрокосмических средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для изучения и контроля природных экзогенных и эндогенных процессов, метеорологической, ледовой и экологической обстановки, а также климатических изменений.

Нефтегазопроисковые работы, строительство и функционирование объектов топливно-энергетического комплекса в арктических и субарктических регионах несут значительные риски для персонала и экологии ввиду сложных природно-климатических условий и наличия криогидро- и криолитосфер. Многолетнемерзлые породы (ММП) и залежи газовых гидратов сдерживают перманентную дегазацию Земли, экранируя субвертикальную миграцию газа [2—13]. За счет этого под толщами газогидратов и/или ММП (нередко и внутри ММП) накапливаются большие объемы газа и возникают аномально высокие или даже сверхлитостатические давления [11], способные прорвать природный экран, привести к катастрофическим изменениям природного



Рис. 1. Бованенковский кратер выброса газа С1: виды из вертолета (1) и с земли (2, 3)  
(фото В. И. Богоявленского, 25 августа 2014 г.)

Fig. 1. Bovanenkovo gas blowout crater C1: views from a helicopter (1) and from the ground (2, 3)  
(photo by V. I. Bogoyavlensky, August 25, 2014)

ландшафта и нанести большой урон объектам нефтегазовой отрасли.

На полуострове Ямал в районах выявленных многочисленных опасных объектов [2—4; 7—13] расположены уникальные по сложности строительства и функционирования объекты инфраструктуры Бованенковского, Новопортовского и Южно-Тамбейского нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ), включая самый северный в мире завод по сжижению природного газа «Ямал СПГ» стоимостью 27 млрд долл. Для контроля состояния протяженных (многие десятки тысяч километров) нефте- и газопроводов требуется непрерывный мониторинг не только с применением автоматизированных систем датчиков, но и с помощью ДЗЗ, включая применение беспилотных летательных аппаратов / воздушных судов (БПЛА/БВС).

Авторы длительное время разрабатывают, тестируют и применяют в реальных условиях Арктики новые технологии выявления, изучения и мониторинга развития опасных газогидродинамических процессов в верхней части системы литосфера-криосфера-гидросфера-атмосфера (ЛКГА) [2—14]. В результате этих работ научно обосновано, что особенно высокую опасность представляют процессы формирования многолетних бугров пучения (МБП), связанных

не с криогенными (булгуньяхи-пинго-гидролакколитами), а с газодинамическими механизмами [2—4; 7—13]. Подобные бугры способны приводить к катастрофическим процессам на поверхности Земли, заключающимся в мощных выбросах, самовоспламенениях и даже взрывах газа. В результате образуются гигантские кратеры выбросов газа с брустверами из выброшенных пород (рис. 1). При этом разлет мерзлых кусков породы и ледогрунта достигает 300—900 м [2—4; 7—14].

Мощные выбросы газа на суше и со дна водоемов (термокарстовые озера и реки) Арктики неоднократно происходили в непосредственной близости и даже на территории осваиваемых месторождений углеводородов (УВ) севера Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) и Красноярского края, а также в 1—3,5 км от их инфраструктуры, включая нефтегазопроводы высокого давления и железную дорогу на Ямале [2—13]. За шестилетний период исследований на севере ЯНАО по данным ДЗЗ и экспедиционных исследований впервые выявлено и занесено в геоинформационную систему «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО») более 12 тыс. МБП, включая 7185 МБП на полуострове Ямал, и около 20 кратеров выбросов газа. Кроме того, на Ямале впервые выявлено 1860 зон активной дегазации со

## Новые технологии освоения Арктики

дна 1667 термокарстовых озер с кратерами выбросов газа, 2 заливов и 4 рек [9; 10].

В 2014 г. первым автором данной статьи была сформулирована и опубликована в первых [2; 3] и последующих [4; 7—13 и др.] работах принципиально новая модель, объясняющая механизм формирования МБП и мощных выбросов газа с образованием гигантских кратеров. Согласно этой модели газ накапливается в неглубокой полости, образовавшейся на месте постепенного вытаявания снизу (а не сверху) подземного льда, происходящего за счет аномального теплового потока Земли в зонах разломов. В процессе подтока газа в полости увеличивается давление, которое начинает деформировать вышележащую толщу (6—10 м), а потом, набрав силу примерно до 12—15 атм, пробивает крышку полости из ММП, включая верхнюю часть ледогрунта, и газ вырывается наружу. За прошедшие шесть лет эта модель получила все необходимые подтверждения, выверенные на ряде объектов, а также при проведенном нами математическом и физическом моделировании [10—13].

В ходе исследований авторами были разработаны, опробованы, применены в ходе 13 полевых экспедиций на Ямале новые технологии комплексного анализа данных ДЗЗ при выявлении, изучении и мониторинге развития бугров пучения и кратеров катастрофических выбросов газа на суше и водоемах Арктики. В основе данных технологий лежит специализированная цифровая обработка больших массивов входных данных.

Целью настоящей работы является демонстрация новых возможностей и особенностей применения цифровых технологий обработки и интерпретации данных ДЗЗ для решения стоящих задач повышения безопасности функционирования комплексов нефтегазовой отрасли и других объектов, а также для дистанционного мониторинга состояния экосистемы в арктических и субарктических условиях.

### Новые возможности дистанционного зондирования Земли из космоса

При выполнении трудоемкой многолетней работы авторы использовали многочисленные источники данных ДЗЗ, базирующиеся на различных принципах получения и обработки космоснимков (КС) [2—16]. Одно из направлений мониторинга природных и техногенных опасных процессов в Арктике связано с возможностью построения трехмерных цифровых моделей рельефа (ЦМР/DEM — digital elevation model) на основе обработки стереопар КС [8; 13; 16—18]. При необходимости для целей исследования опасных экзогенных и эндогенных процессов на конкретных участках возможно выполнение эксклюзивной обработки стереопар КС [17; 18], что дорого и не подходит для целей регионального мониторинга различных процессов на обширных территориях Арктики.

Большим подспорьем в выполнении разнообразных мониторинговых исследований в Арктике, в том

числе описанной выше работы авторов, служат новые возможности ДЗЗ, связанные с находящимися в открытом доступе ЦМР ArcticDEM, разработанными специалистами Полярного геопространственного центра PGC (Polar Geospatial Center, <https://www.pgc.umn.edu>) Университета Миннесоты в сотрудничестве с партнерами (ESRI и др.) [16]. Данная работа была поддержана и профинансирована Национальным агентством геопространственной разведки NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) и Национальным научным фондом NSF (National Science Foundation) США. Первый этап работ по расчету ЦМР был завершен в сентябре 2016 г. для штата Аляска.

В новой версии ArcticDEM Release 7 (доступна с сентября 2018 г.) разрешение всех ЦМР составило 2 м/пикс., что в 2,5 раза выше, чем в ранних версиях. Отметим, что предыдущая версия ArcticDEM Release 6 (доступна с сентября 2017 г.) включала смесь ЦМР с разрешениями 5 и 2 м/пикс. Итоговая мозаика ЦМР ArcticDEM покрывает всю сушу Циркумарктического региона (около 23,07 млн км<sup>2</sup>) до широты 60°, а в отдельных местах (на Камчатке, Алеутских островах, в южной части штата Аляска) — почти до 50°. Сводные мозаики ЦМР ArcticDEM подготовлены в виде фрагментов — тайлов (tiles) 100×100 км (2488 шт.) и сабтайлов (subtiles) 50×50 км (9228 шт.). Каждый из таких фрагментов — результат анализа, коррекции и обобщения многочисленных перекрывающихся ЦМР (кратность покрытия меняется от 1 до 10 и более раз), построенных при независимой обработке стереопар КС по полосам — стрипам (strips) пролета спутников. Большая часть стрипов имеет размеры 110—120 км в длину и 16—18 км в ширину с разрешением 2 м/пикс. в 32-битном формате GeoTIFF (эллипсоид WGS84) [16]. В 7-й версии ArcticDEM синтезировано 185,8 тыс. новых полос ЦМР, кроме того, доступны 75 тыс. переобработанных полос предыдущих версий. Ведется работа по расширению ЦМР на более южные широты.

При расчетах ЦМР специалисты PGC использовали стереопары КС высокого разрешения (около 0,5 м/пикс.) четырех полярно-орбитальных спутников американской компании «DigitalGlobe»: WorldView-1, WorldView-2 и WorldView-3 (далее — WV-1, WV-2, WV-3), а также GeoEye-1 [16]. Обработка ряда перекрывающихся стереопар КС (преимущественно панхроматических) проводится методом фотограмметрии (стереоавтокорреляция) на одном из самых мощных в мире суперкомпьютерах Blue Waters в Национальном центре суперкомпьютерных приложений в Университете штата Иллинойс NCSA (National Center for Supercomputing Applications at the University of Illinois).

Мозаичные ЦМР собираются из многополосных ЦМР с целью получения единообразного и комплексного продукта на больших площадях. Тайлы ЦМР ArcticDEM доступны не только с высоким разрешением 2 м/пикс., но в осредненном виде для

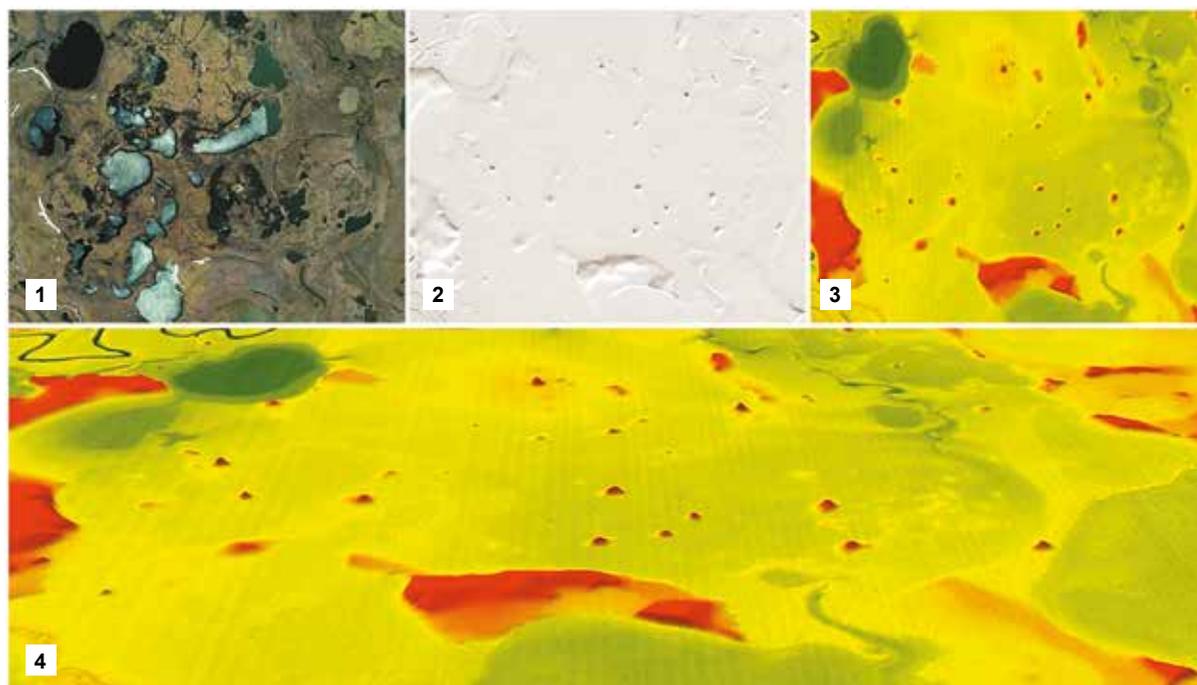


Рис. 2. Выделение многолетних бугров пучения: космоснимки в оптических диапазонах частот в летнее (1) и зимнее (2) время в плане, цифровая модель рельефа в плане (3) и в трехмерном виде (4)

Fig. 2. Identification of perennial heaving mounds: satellite images in the optical frequency ranges in summer (1) and winter (2) time in plan, digital elevation model in plan (3) and in 3D form (4)

региональных и мегарегиональных моделей с разрешением 10, 32, 100, 500 и 1000 м/пикс. [16]. Авторы данной статьи убедились, что при этом устраняются отдельные места с бракуемыми данными по стрипам и повышается достоверность ЦМР в целом. Однако происходит потеря их детальности, выражающаяся в сглаживании итогового массива ЦМР. Кроме того, теряется временная привязка исходных стрипов ЦМР.

Авторы накопили большой опыт работ с ЦМР ArcticDEM для решения различных задач [8; 13], который базируется на специальных технологиях комплексного анализа и обработки тайлов и стрипов ЦМР, частично изложенных ниже.

### Технологии изучения и мониторинга опасных процессов в Арктике

Выявление многолетних бугров пучения по космоснимкам высокого и среднего разрешения в оптическом диапазоне крайне затруднительно, а в ряде случаев неоднозначно. При аэрофотосъемке, проводившейся во времена СССР в 1970—1980-х годах для объемного дешифрирования, использовались стереопары аэрофотоснимков, по которым Военно-топографическим управлением Генерального штаба Вооруженных сил СССР были подготовлены карты различных масштабов. При этом в российской части Арктики были выделены и нанесены на карты тысячи МБП, в том числе на полуострове Ямал — 1967 [9].

В работах [9; 10] отмечается, что гораздо легче и надежнее МБП выделяются по зимним КС Landsat-8 (рис. 2.2). При этом основным критерием дешифрирования служит комбинация освещенной и теневой сторон бугра за счет низкого положения Солнца [9; 10]. Благодаря отсутствию высокой растительности создается визуальный аналог теневой отмывки (псевдообъемного изображения) рельефа. В целях удобства работы для полуострова Ямал была подготовлена и использована мозаика, состоящая из 10 исходных сцен зимних КС Landsat-8 с разрешением 15 м (см. рис. 2.2). Координаты вершин МБП были занесены в ГИС «АМО».

Новые возможности не только по выявлению, но и по мониторингу пространственных изменений локальных объектов появились на основе доступных стрипов ЦМР ArcticDEM [8; 13; 16; 18]. Согласно данным PGC и ESRI для Ямала и сопредельных территорий тайлы и стрипы были сформированы в июле-августе 2018 г., при этом, видимо, были использованы КС 2013—2017 гг.

В качестве иллюстрации успешного применения мозаики ЦМР ArcticDEM приведем пример уверенного выделения 24 локальных округлых поднятий — потенциальных МБП с максимальными размерами в плане до 140—170 м на участке полуострова Ямал (координаты центра 69,08° с. ш. и 71,75° в. д.), сформированных в ArcGIS в плане (рис. 2.3) и в трехмерном виде (рис. 2.4). В целом для всего полуострова Ямал, несмотря на выявленные недостатки,

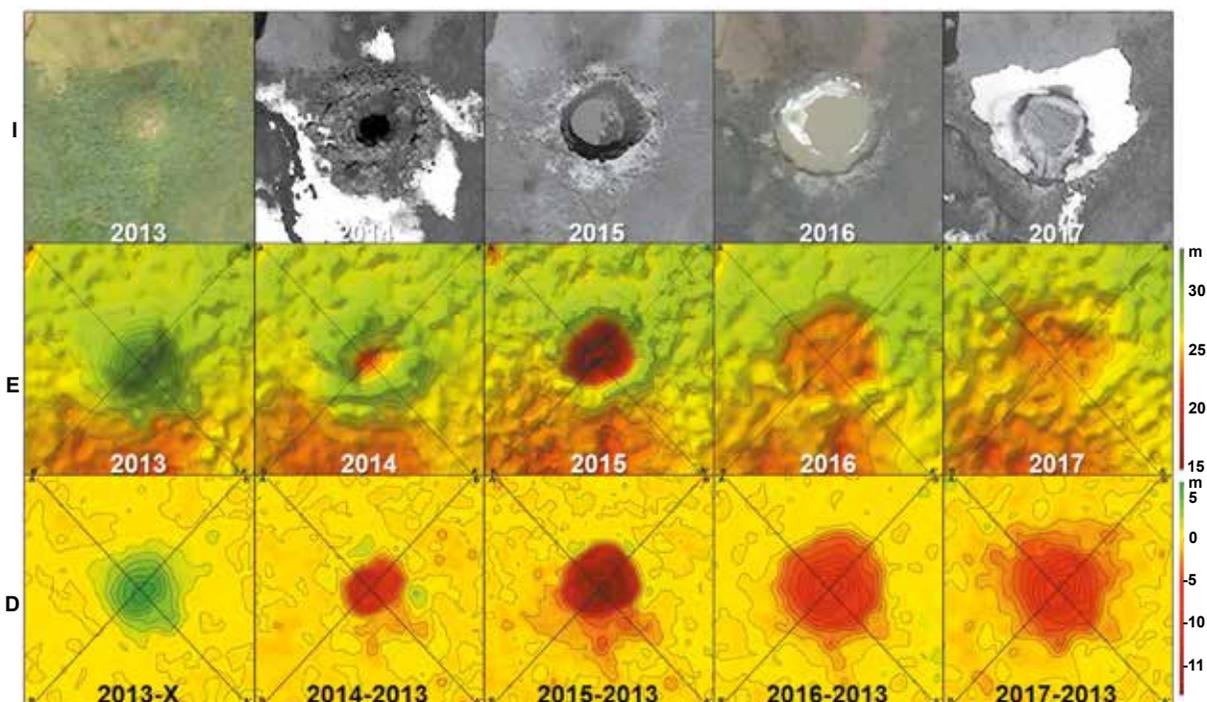


Рис. 3. Исследования бугра пучения и кратера выброса газа на Бованенковском объекте С1 по данным ДЗЗ: космоснимки (I); ЦМР (E – Elevation) и мониторинг различий ЦМР по годам (D – Difference).

Примечания. 1. Конкретные даты ЦМР приведены в табл. 1. 2. А-А' и В-В' – положения разрезов, приведенных на рис. 4

Fig. 3. Investigations of heaving mound and the gas blowout crater at the Bovanenkovskoye object C1 according to RS data: satellite images (I); DEMs (E – Elevation) and monitoring of DEM differences by years (D – Difference).

Notes. 1. Specific dates of the DEM are given in table 1. 2. A-A' and B-B' are the positions of the cross-sections shown in Fig. 4

мозаики ЦМР позволили провести проверку и коррекцию координат МБП, определенных по зимним КС [9]. В итоге общее количество обнаруженных МБП составило 7185, что в 3,7 раза больше, чем на картах Генштаба [9; 10].

Отметим, что процедура выделения МБП облегчается с применением цифровой фильтрации входных данных, при которой в ArcGIS из исходного массива ЦМР вычитается осредненный (низкочастотный — сглаженный) массив данных. Размер фильтра подбирается эмпирическим путем с учетом 3–5-кратного превышения размеров целевых объектов. Автоматизированное выделение МБП на ЦМР на основе распознавания образов с элементами искусственного интеллекта в алгоритмическом плане более просто в реализации, чем на основе анализа зимних КС. Такая работа выполнена в сотрудничестве Института проблем нефти и газа РАН с Муромским институтом (филиалом) Владимирского государственного университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых (результаты готовятся к публикации) [9].

Особо ценным в ЦМР Arctic DEM является то, что исходные стрипы имеют временную привязку, позволяющую проводить мониторинг изменений локальных объектов, включая изменения размеров и конфигурации МБП и термокарстовых озер. Кроме того, они дают уникальную возможность по поиску

других аномальных объектов, включая кратеры выбросов газа.

В качестве примера успешного применения ЦМР ArcticDEM приведем результаты анализа данных на наиболее известном и изученном объекте — кратере мощного выброса газа С1 (в ГИС «АМО»), расположенном в 30 км южнее Бованенковского НГКМ в 3,5 км от магистрального газопровода высокого давления «Бованенково — Ухта» [2; 3]. На рис. 3.1 приведена пятилетняя серия КС WV-2 2013.07.21, WV-1 2014.06.15, WV-1 2015.07.07, WV-2 2016.06.19, WV-1 2017.06.19. Анализ данных ряда КС различного разрешения, включая WV-2 21 июля 2013 г. (рис. 3 — I.2013), показал, что на месте кратера С1 существовал крупный МБП диаметром до 60 м. По данным ДЗЗ наиболее вероятное время выброса газа с разрушением МБП определено как март 2014 г. [4; 14]. Согласно данным КС внутренние диаметры кратера С1 составили в июне 2014 г. 14×17 м, а в июле 2015 г. — 25×29 м (в нижней части у воды). По данным экспедиционных замеров в августе 2014 г. глубина кратера, видимо, была около 50 м.

По состоянию на октябрь 2018 г. для района кратера С1 имелись ЦМР по пяти разновременным стрипам: WV-1 9 июня 2013 г., WV-1 15 июня 2014 г., WV-1 7 июля 2015 г., WV-3 17 июня 2016 г. и WV-2 31 мая 2017 г. (табл. 1), фрагменты которых разме-

**Таблица 1. Краткие характеристики ЦМР ArcticDEM по стрипам в районе объекта С1**

Спутник	Дата	Размер, км	Альтитуды ЦМР, м		Отклонение от 2013 г., м
			Min	Max	
WV-1	2013.06.09	113×18	-51,9	335,2	0,0
WV-1	2014.06.15	113×19	-71,1	78,9	-1,2
WV-1	2015.07.07	21×18	-63,4	315,8	-4,2
WV-3	2016.06.17	114×15	-48,7	261,9	-2,0
WV-2	2017.05.31	50×17	-78,55	222,6	-2,3

ром 120×120 м приведены на рис. 3 — Е. Анализ ЦМР по 5 стрипам показал наличие значительных недостатков фотограмметрической обработки (см. табл. 1). Экстремальные значения меняются от -78,6 м (WV-2 31 мая 2017 г.) до +335,2 м (WV-1 9 июня 2013 г.), а для ЦМР 2013 г. максимальный диапазон разброса амплитуд достиг 387,1 м. При этом реальные альтитуды рельефа Ямала не превышают 90 м и не могут быть отрицательными. Даже итоговый сабтайл размером 50×50 км, созданный 8 июля 2018 г. по совокупности стрипов 2013—2017 гг., имеет однозначно бракованные значения альтитуд от 0 до -70,2 м и в диапазоне от 90 до 140,5 м. В районе объекта С1 для пяти ЦМР также были выявлены существенные расхождения по вертикали осредненных поверхностей рельефа местности. Оценка этих отклонений (уходов) 4 стрипов по отношению к ЦМР 9 июня 2013 г. приведена в табл. 1. Для них минимальные отклонения 1,2 м выявлены для ЦМР 15 июня 2014 г., а максимальные 4,2 м — для ЦМР 7 июля 2015 г. С учетом этих индивидуальных уходов все 5 ЦМР были приведены (дополнительно смещены вверх на 4 м) к единому уровню, определенному по альтернативным данным (авторские полевые замеры GPS, данные карт Генштаба).

В итоге, несмотря на обнаруженные существенные погрешности ЦМР по стрипам, в целом в районе кратера С1 они оказались кондиционными и пригодными для анализа динамики изменений рельефа местности, что видно по пяти ЦМР рис. 3.Е (2013—2017), на которых четко видны МБП (рис. 3 — Е.2013) и кратер различной глубины для 2014—2017 гг. (изолинии проведены через 1 м). Глубина кратера в 2014 г. на ЦМР оказалась меньше, чем в 2015 г., что является артефактом изображения на КС очень глубокого дна кратера в июне 2014 г. (около 40 м до уровня воды), не видимого на КС из-за непрохождения косых лучей солнечного света. При этом на КС WV-1 кратер выглядит, как «черная дыра». В 2015 г. за счет таяния ледовых стен кратер С1 расширился и в большей степени был затоплен водой (см. рис. 3 — Е.2015), поверхность которой с плавающими частицами торфа стала хо-

рошо распознаваемой на КС, что позволило достаточно точно определить уровень воды при построении ЦМР. В 2016—2017 гг. кратер был почти полностью затоплен водой, и ее поверхность практически сравнялась с уровнем земли. Для более детального и наглядного представления сказанное выше подтверждается разрезами ЦМР на рис. 4 (Elevation) по двум ортогональным профилям А-А' и В-В', положение которых показано на рис. 3 — Е.

Наличие отредактированных, приведенных к единому уровню ЦМР (см. рис. 3 — Е) позволяет проводить не только качественный, но и количественный анализ изменений в различных комбинациях, например через один, два или три года. В этом случае делается вычитание из ЦМР анализируемого года ЦМР года сравнения. Таким образом, осуществляется цифровой 4D-мониторинг (четвертое измерение — время), который давно и успешно применяется в сейсморазведке для 4D-мониторинга разработки месторождений нефти и газа [3; 12]. При этом обычно проводится сравнение каждой новой 3D-модели с первоначальной. Подобный 4D-мониторинг мы провели и для изучаемого Бованенковского объекта С1.

На рис. 3 — D приведены разностные ЦМР по объекту С1 для четырех лет (2014—2017 гг.) по сравнению с 2013 г., рассчитанные в пакете программ ArcGIS. При этом для 2013 г. была рассчитана разница между ЦМР 2013 г. и синтезированной ЦМР (X), полученной после расчета изолиний по входным дискретным данным ЦМР в пикселях, выявления и устранения всех замкнутых изолиний, соответствующих МБП, с последующим пересчетом в дискретную ЦМР. На рис. 4 (Difference) приведены разрезы по профилям А-А' и В-В', построенные по разностным ЦМР. Анализ разностных результатов рис. 3 — D и рис. 4 (Difference) позволяет сделать однозначный вывод о возможности 4D-мониторинга изменений рельефа местности по стрипам ArcticDEM, особенно надежно работающего в зонах катастрофических изменений, связанных со взрывными и оползевыми процессами.

В ходе обработки данных ЦМР для района объекта С1 были уточнены размеры МБП. По состо-

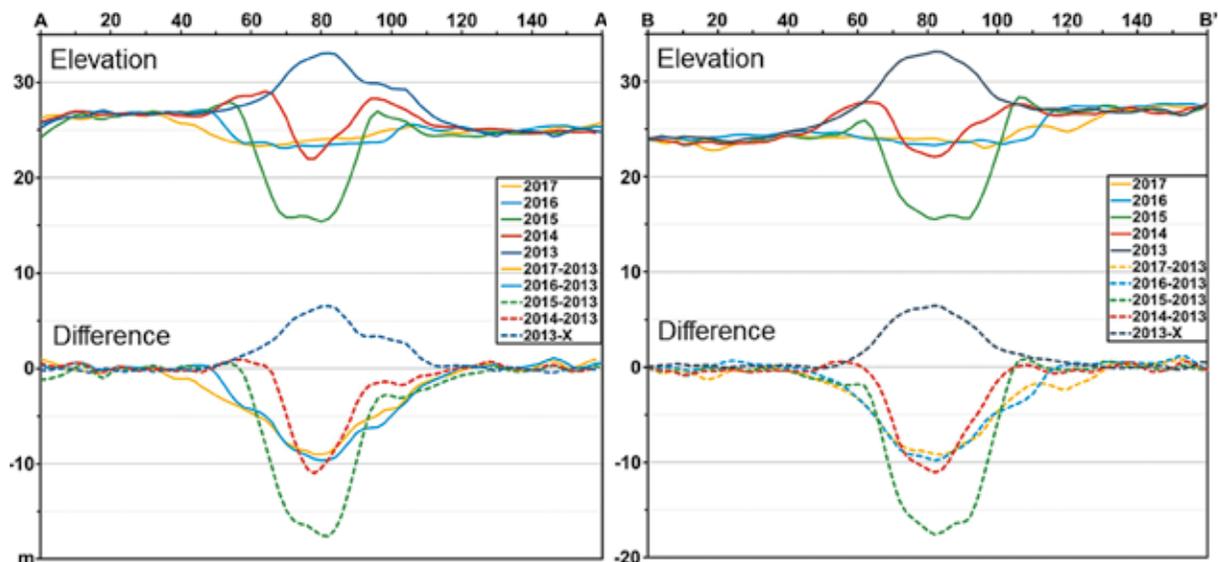


Рис. 4. Исследования бугра пучения и кратера выброса газа на Бованенковском объекте С1 на ЦМР 2013–2017 гг. по профилям А-А' и В-В' (положение показано на рис. 3): Elevation – разрезы ЦМР; Difference – мониторинг изменений ЦМР  
 Fig. 4. Investigations of the heaving mound and the gas blowout crater at the Bovanenkovo object С1 at the 2013–2017 DEMs along profiles А-А' and В-В' (the position of profiles is shown in Fig. 3): Elevation – DEM sections; Difference – monitoring of DEM differences

янию на 9 июня 2013 г. его размеры по крайней замкнутой изолинии 27,2 м составили 62×65 м, а высота — 6,1 м. Эти размеры отличаются от примерных данных А. Кизякова с соавторами (диаметр 45—48 м, высота 5—6 м) [18]; по данным ЦМР они больше в плане на 35,4—37,8%, а по высоте — на 1,7—22%. За счет понижения рельефа местности в южном направлении кажущаяся высота бугра с южной стороны достигает 8 м. В 2014 г. здесь даже остаточная часть бугра с бруствером была около 5 м — в три раза выше роста человека, что хорошо видно на рис. 1.

В качестве второго примера применения разновременных стрипов ЦМР ArcticDEM приведем результаты мониторинга обстановки в районе Сеяхинского кратера выброса газа С11 (в ГИС «АМО»), образовавшегося 28 июня 2017 г. в русле реки Мюдряха (рис. 5 — Е.2017) [8—13]. В результате комплексных исследований данных ДЗЗ и четырех экспедиций (2017—2020 гг.) было установлено, что до выброса, самовоспламенения и взрыва газа на месте сформировавшегося кратера в русле под действием газодинамических процессов активно рос МБП [8; 13]. В 2013 г. его центральная часть, расположенная прямо в русле реки, размывалась речной водой, за счет чего на КС WV-2 высокого разрешения (до 0,5 м) 22 июня в русле реки наблюдаются локальное инородное строение дна и малозаметное искривление левого (юго-восточного) берега (рис. 5 — I.2013). Зимний КС WV-1 19 апреля 2016 г. (рис. 5 — I.2016) малоинформативен, однако на месте изучаемого объекта видны две черные полосы, наиболее вероятно, связанные с трещинообразованием в поверхности свода МБП. На летнем КС WV-3 27 июля

2017 г. наблюдается кратер диаметром около 90 м (см. рис. 5 — I.2017).

Для анализа Сеяхинского объекта С11 из базы данных ЦМР ArcticDEM оказались доступными данные по 6 стрипам (3 для 2013 г., 2 для 2016 г. и 1 для 2017 г.), краткая характеристика которых дана в табл. 1. Анализ этих данных, как и в предыдущем случае, выявил ряд недостатков расчета ЦМР при фотограмметрической обработке, заключающихся во многих больших отклонениях значений альтитуд на отдельных участках суши и на поверхностях водоемов от реальных (см. табл. 1). Экстремальные значения меняются от -74,3 м (WV-3 27 июля 2017 г.) до +454,5 м (WV-3 28 февраля 2016 г.), а в реальности для Ямала — от 0 до 90 м. Итоговый сабтайл размером 50×50 км (подготовлен 8 июля 2018 г. по совокупности стрипов 2013—2017 гг.) имеет явно бракованные значения альтитуд с отрицательными значениями от 0 до -20,2 м.

В районе объекта С11 были выявлены существенные расхождения по вертикали поверхностей рельефа местности, при этом данные только одной ЦМР от 14 марта 2013 г. оказались выше нуля (в среднем 1,6 м), а пять других ошибочно «ушли» в отрицательную область (рис. 6). Оценка этих уходов 5 стрипов по отношению к ЦМР 14 марта 2013 г. приведена в табл. 1. Для них минимальные отклонения 3,4 м выявлены для ЦМР 27 июля 2017 г., а максимальные 5,8 м — для 3 мая 2013 г. Максимальный диапазон разброса амплитуд для КС 28 февраля 2016 г. достиг 511,5 м (вместо не более чем 90 м). Кроме того, сопоставление данных всех 6 ЦМР с альтернативными источниками информации (авторскими полевыми замерами GPS, картами Генштаба) показало

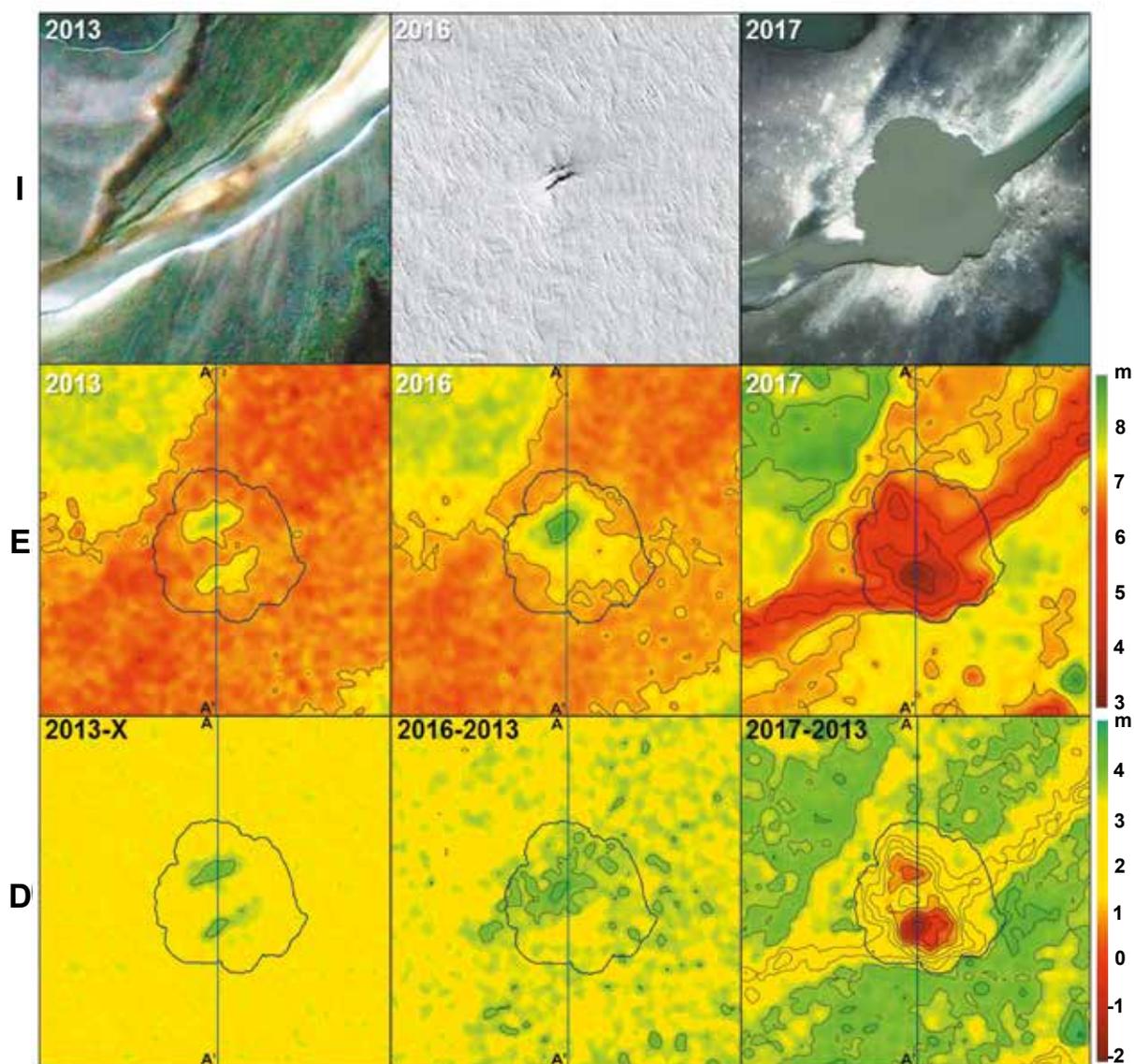


Рис. 5. Исследования бугра пучения и кратера выброса газа на Сейяхинском объекте С11 по данным ДЗЗ: I – космоснимки; E – ЦМР, D – мониторинг различий ЦМР по годам.

Примечания. 1. Конкретные даты ЦМР приведены в табл. 2. 2. A-A' – положение разреза, приведенного на рис. 6 и 7

Fig. 5. Investigations of heaving mound and the gas blowout crater at the Seyakha object C11 according to RS data: I – satellite images; E – DEM, D – monitoring of DEM differences by years.

Notes. 1. Specific dates of the DEM are given in table 2. 2. A-A' – the position of the cross-sections shown in Fig. 6 and 7

Таблица 2. Краткие характеристики ЦМР ArcticDEM по стрипам в районе объекта С11

Спутник	Дата	Размер, км	Альtitуды ЦМР, м		Отклонение от 2013.03.14, м
			Min	Max	
WV-2	2013.03.14	114×18	-5,9	34,3	0,0
WV-1	2013.05.03	115×19	-62,9	182,3	-5,8
WV-2	2013.07.19	115×17	-32,4	36,3	-5,5
WV-3	2016.02.28	113×14	-57,0	454,5	-4,2
WV-1	2016.04.19	114×18	-8,9	35,2	-4,2
WV-3	2017.07.27	113×13	-74,3	243,2	-3,4

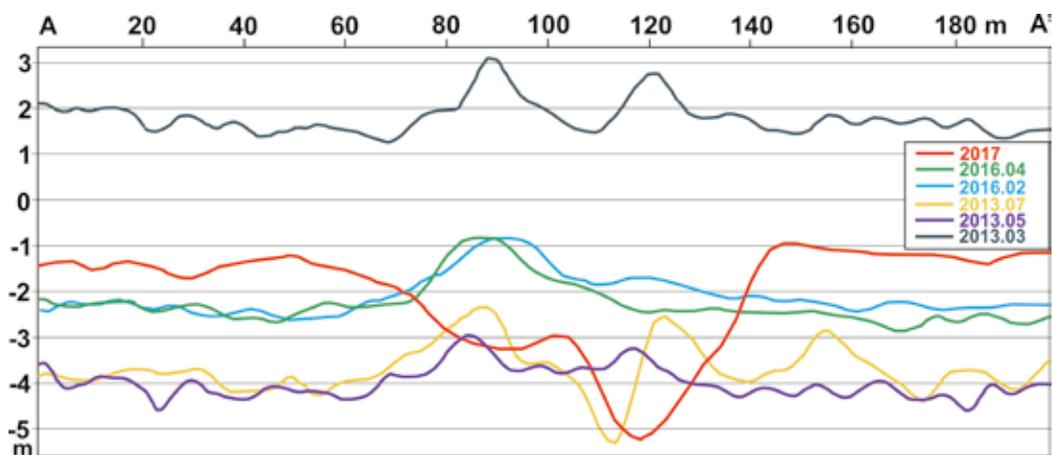


Рис. 6. Рельеф поверхности Сейяхинского объекта C11 по меридиональному профилю А-А' по данным 6 стрипов ЦМР 2013, 2016 и 2017 гг. до коррекции  
 Fig. 6. The surface relief of the Seyakha object C11 along the meridional profile A-A' according to the data of 6 DEM strips in 2013, 2016 and 2017 before correction

необходимость их дополнительного смещения вверх примерно на 5 м. Отметим, что в двух случаях были выявлены небольшие (5 и 6 м) смещения по горизонтали. Несмотря на это, в целом после указанной выше коррекции ЦМР по 5 стрипам (за исключением 19 июля 2013 г.) оказались кондиционными и пригодными для площадных построений карт и локального анализа динамики изменений рельефа местности в районе объекта C11 (см. рис. 5 и 7).

На рис. 5 — Е приведены в трехмерном виде три ЦМР ArcticDEM для участка объекта C11 200×200 м: средние из двух зимних для 2013 г. (14 марта и 3 мая) и 2016 г. (28 февраля и 19 апреля), а также летняя ЦМР 2017 г. (27 июля). На всех ЦМР 2013 г. на обоих берегах видны локальные приподнятые участки с относительным превышением рельефа порядка 1—1,4 м, также хорошо видны на осредненной ЦМР за 2013 г. (рис. 5 — Е.2013) [8]. Зимние ЦМР 2013 и 2016 гг. визуально сильно отличаются от летней 2017 г. — они менее выразительны по амплитуде из-за выравнивания рельефа местности при занесении снегом низменных частей, особенно долины и русла реки. На рис. 5 — Е.2017 четко видно русло реки и две отрицательные локальные подводные аномалии над кратером, которые также видны на разрезе А-А' (см. рис. 7 — Elevation). Рассчитанные автоматически подводные аномалии ЦМР ArcticDEM на порядок меньше реальной замеренной глубины кратера (56 м) [13]. Они, видимо, соответствуют поверхности зоны смешения прозрачной для солнечного света речной воды с мутной водой в кратерном водоеме. Отметим, что на другом кратерном озере с чистой водой на ЦМР была определена глубина дна, видимого на КС.

На рис. 5 — D приведены результаты 4D-мониторинга изменений ЦМР по годам исследований, получаемые путем вычитания из текущих ЦМР 2016 и 2017 гг. первоначальной 2013 г. (см. рис. 5 —

D.2016-2013 и рис. 5 — D.2017-2013). При этом для 2013 г. также была рассчитана разница между ЦМР 2013 г. и синтезированной ЦМР (X), полученной после устранения двух аномальных поднятий МБП на берегах реки. Отметим, что на разностной ЦМР 2016 г. выделяется лишь одно поднятие на правом (северном) берегу реки, что связано с полным размытием рекой поднятия на левом берегу.

Несмотря на полное затопление кратера C11 речной водой сразу после взрыва, на разностной ЦМР рис. 5 — D.2017-2013 и соответствующем разрезе рис. 7 — D видны ярко выраженные аномалии (как и на объекте С1), свидетельствующие о произошедших кардинальных катастрофических изменениях ранее сложившегося ландшафта.

### Анализ последствий техногенных катастроф в Арктике

При бурении поисково-разведочных скважин нередко возникают аварийные ситуации, часть которых заканчивается катастрофическими выбросами газа и смесей углеводородов. При этом обычно образуются крупные и даже гигантские кратеры с размерами в плане: 200—240 м на скважине Бованенковская-118 (1984 г.), 300—400 м на площадке German Bight (Северное море, кратер Figge-Maar, 1963 г.), 500 м на скважине Пурпейская-101 (1965 г.) [3; 11]. Ряд долговременных катастрофических извержений газа и смесей УВ в Арктике произошел в 1980-х годах на Кумжинском (1980—1987 гг.), Бованенковском (1984—1988 гг.) и Харасавэйском (1986—1987 гг.) месторождениях [3; 5; 6; 11; 12].

Мозаика (тайлы) ЦМР ArcticDEM и стрипы несут важную дополнительную информацию о последствиях техногенных катастроф в Арктике, произошедших на многих месторождениях УВ. В качестве иллюстрации приведем небольшую часть имеющихся у авторов материалов по самой опасной в насто-

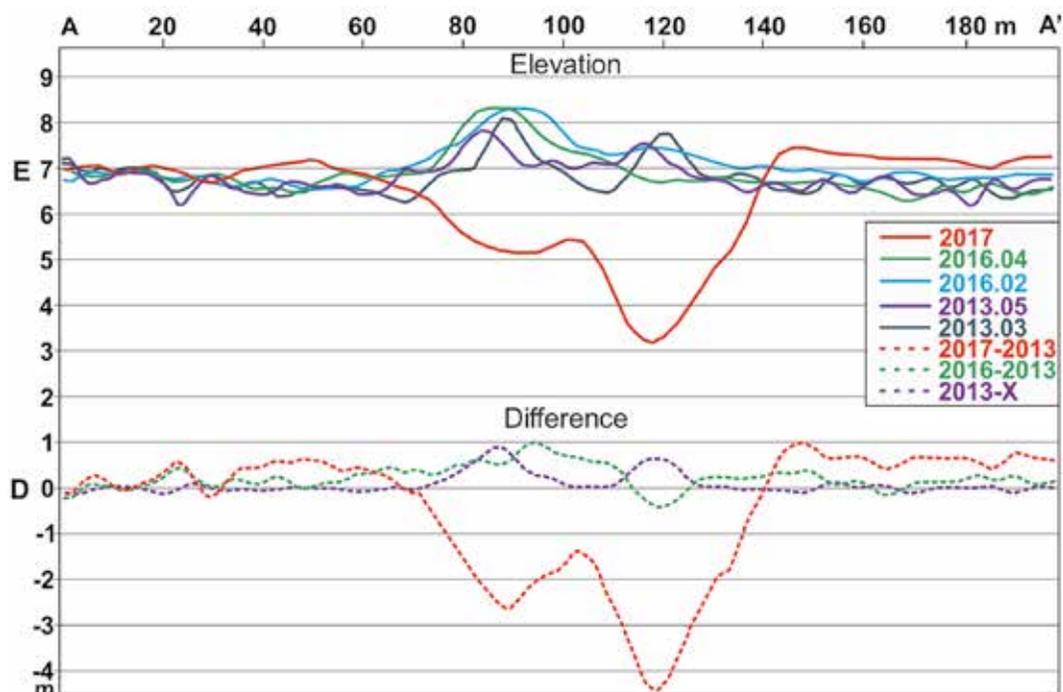


Рис. 7. Рельеф поверхности Сейяхинского объекта исследований C11 по меридиональному профилю A-A' по данным 5 стрипов ЦМР 2013, 2016 и 2017 гг. после коррекции: E (Elevation) – разрезы ЦМР, D (Difference) – мониторинг изменений ЦМР  
 Fig. 7. The surface relief of the Seyakha object C11 along the meridional profile A-A' according to the data of 5 DEM strips in 2013, 2016 and 2017 after correction: E (Elevation) – DEM sections, D (Difference) – monitoring of DEM changes

ящее время в Арктике зоне, расположенной в северной части Кумжинского НГКМ. Здесь 6 ноября 1980 г. из-за человеческого фактора в скважине № 9 произошел аварийный выброс газа, вскоре переросший в мощное 6,5-летнее (2384 сут до 18 мая 1987 г.) катастрофическое извержение смеси УВ по заколонным пространствам четырех разведочных скважин (№ 9, 5, 10 и 134). При этом жидкие УВ попали по реке Печора (протока Малый Гусинец) в Коровинскую губу Печорского моря, расположенную всего в 3 км к северу, и загрязнили его побережье. Данная катастрофа имеет тяжелые последствия для экосистемы Арктики, подробно проанализированные и описанные в работах [5; 6].

На рис. 8.1 приведен КС WV-2 участка 370×630 м аварийной площади Кумжинского НГКМ, сделанный 2 мая 2016 г. в период весеннего таяния снежно-покрова суши и льда над протокой Малый Гусинец, а на рис. 8.2 — летний КС WV-3 с поверхностью воды, свободной ото льда. На поверхности льда выделяются многочисленные темные пятна диаметром до 10 м, соответствующие разрушенным выбросами (пневматическими выхлопами) газа зонам льда (пробоинам) и проталинам в зоне вмержших пузырей газа, выделенные тремя красными окружностями А, В и С. Эти три зоны расположены над тремя подводными кратерами выбросов смеси УВ. Наличие круговых проталин и пробоин во льду является одним из самых характерных признаков дегазации недр, подробно описанных в ряде наших работ [4—12].

При этом наиболее сильно лед разрушен над объединенным самым крупным кратером В, на дне которого расположены разрушенные устья скважин № 9 и 5. Вокруг зон отсутствия льда над кратерами скважин № 9, 5 и 10 (А и В) лед локально окрашен в коричневый цвет, что вызвано его загрязнением жидкими УВ. Подобная ситуация была зафиксирована по КС в 2017 г. По полевым наблюдениям места катастрофы, проведенным в разные годы специалистами Всероссийского нефтяного научно-исследовательского геологоразведочного института (ВНИГРИ) и Института географии РАН, над кратерами наблюдались выходы пузырей газа и нефтяные пленки на поверхности воды [5; 6; 19; 20].

На рис. 8.3 приведен фрагмент тайла ЦМР ArcticDEM, на котором видны все локальные особенности рельефа местности. Особенно выделяется построенная в 1981—1982 гг. дамба с замкнутым контуром, перекрывшая в двух местах протоку для ограничения попадания жидких УВ в Печорское море. Очевидно, что разновременные ЦМР (имеются 11 стрипов 2010—2017 гг.) позволяют дистанционно контролировать состояние построенного защитного сооружения (дамбы).

На основе ЦМР рис. 8.3 с учетом данных батиметрических замеров ВНИГРИ [20] построена обновленная комплексная детализированная трехмерная ЦМР поверхности земли и дна водоемов с подводными кратерами с показанными положениями устьев аварийных скважин (слева направо № 10,

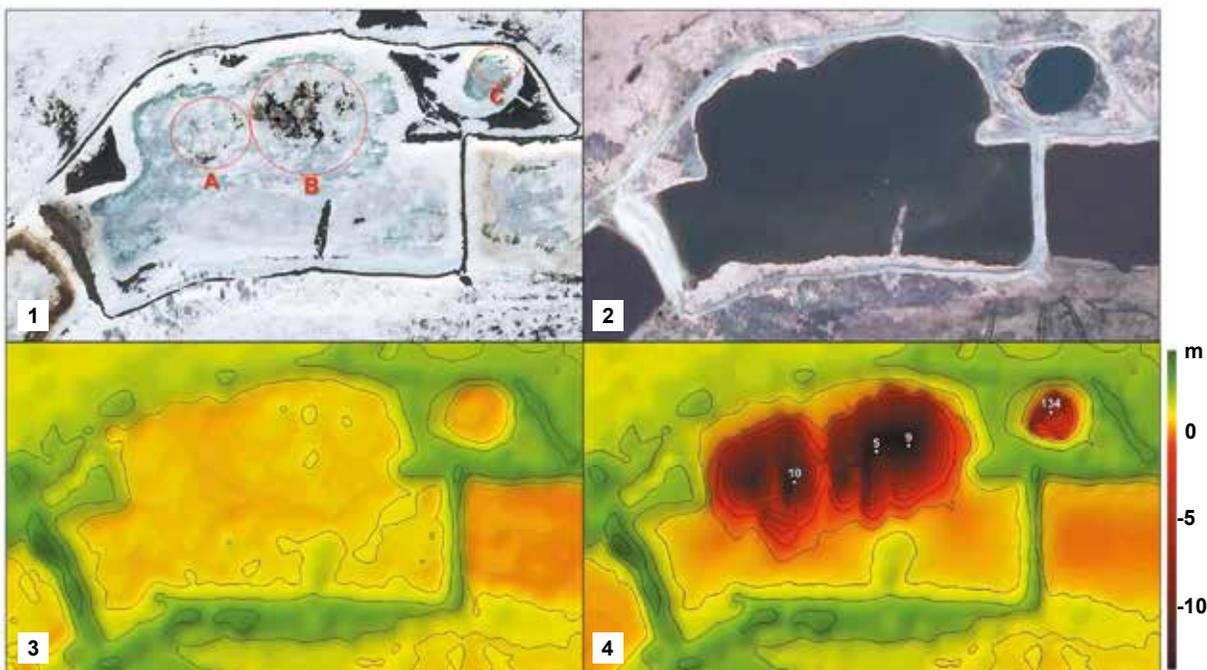


Рис. 8. Исследование места катастрофы на Кумжинском месторождении по данным ДЗЗ: космоснимки WV-2 2 мая и WV-3 12 июня 2016 г. (1 и 2), фрагмент ЦМР ArcticDEM (3) и комплексная ЦМР с подводными кратерами и устьями скважин (4)  
 Fig. 8. Investigation of the catastrophe site at the Kumzhinskoye field according to remote sensing data: satellite images WV-2 on May 2 and WV-3 June 12, 2016 (1 and 2), a fragment of the ArcticDEM (3) and complex DEM with underwater craters and wellheads (4

5, 9 и 134). Размеры кратеров по верхним оконтуривающим их изобатам составляют: А — 92×95 м, В — 95×128 м, С — 75×80 м. В кратере В видны два локальных углубления, к которым приурочены устья скважин № 5 и 9. В кратере А также два углубления, в одном из них (восточном) расположено устье скважины № 10, а западное, видимо, образовалось за счет бокового выброса газа.

### Дистанционное зондирование Земли с применением беспилотных летательных аппаратов

ДЗЗ с применением БПЛА является относительно новым инструментом, позволяющим изучать ситуацию и проводить аэрофотосъемку в труднодоступных местах арктической и субарктической зон Земли с фиксацией важных объектов и событий. Кроме того, современные цифровые возможности фотограмметрической обработки позволяют, как и для КС, по плотной сети аэроснимков строить ортофотопланы и ЦМР. В ряде особо важных случаев компактные и относительно недорогие БПЛА позволяют их использовать с риском потери, который часто возникает в Арктике при уменьшении количества пролетающих спутников, необходимых для надежной пространственной привязки [13].

В качестве основного БПЛА авторы использовали дрон DJI Mavic Pro компании DJI с 4К-камерой DJI FC220 высокого разрешения (12,3 Мп) со стабилизатором. Дрон имеет вес около 740 г, может летать со скоростью до 65 км/ч и преодолевать расстоя-

ния до 13 км (относительно пути назад — 6,5 км) и подниматься на высоту до 5000 м над уровнем моря. Для навигации использовались спутники GPS и ГЛОНАСС.

Применительно к мониторингу изменений Сеяхинского кратера выброса газа С11 использование БПЛА в комплексе с другими методами (эхолокацией, георадиолокацией и др.) позволило построить с помощью программ Pix4Dmapper и ArcGIS детальные ЦМР поверхности земли и дна кратера (рис. 9), а также выявить зоны перманентных выходов газа [8—13].

Уникальные результаты были получены в августе 2020 г. при изучении кратера выброса газа С17, образовавшегося в центральной части полуострова Ямал в 2020 г. Основной объем аэрофотосъемки района кратера С17 проводился с высот 70—250 м (сертифицированный внешний пилот И. В. Богоявленский). На рис. 10.1 приведен фрагмент аэрофотоснимка кратера С17 с высоты полета 50 м. Глубокий (31—36 м) затемненный кратер создавал эффект «черной дыры». В связи с невозможностью фиксации с высоты 50 м сложной формы всей подземной полости, в которой наблюдались два боковых протяженных подземных пространства (глубокие гроты или пещеры), была проведена съемка с залетом дрона внутрь кратера на уровень около 15 м от поверхности земли. При этом происходили кратковременные потери связи дрона со спутниками и резко ухудшилось дистанционное управление. Все это могло привести к потере аппарата.

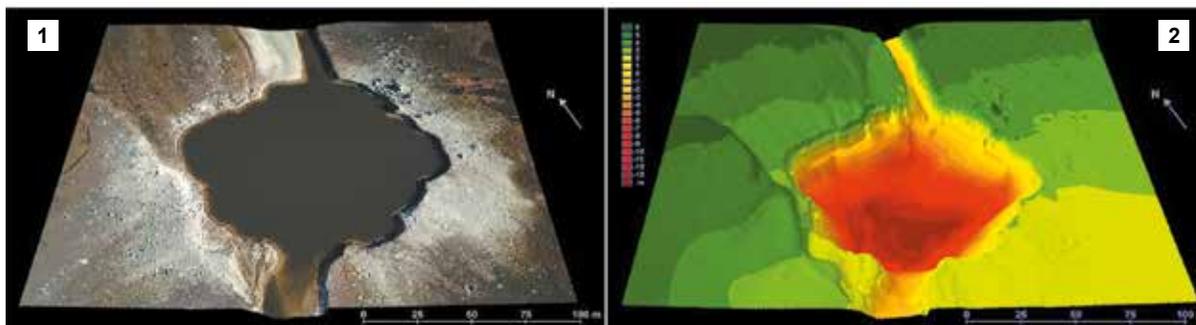


Рис. 9. Сеяхинский кратер выброса газа С11: 3D-модель по данным аэрофотосъемки с БПЛА (1) и комплексная ЦМР с учетом эхолокации и георадиолокации (2)  
Fig. 9. Seyakha crater of gas blowout C11: 3D model based on aerial photography from UAV (1) and complex DEM built with data from echo sounding and ground penetrating radar surveys (2)

Благодаря накопленному опыту управления БПЛА риск потери дрона со всеми результатами съемки был сведен к минимуму, и «подземная аэрофотосъемка» была выполнена успешно. Получены фотографии, дающие возможность для цифровой фотограмметрической обработки. Цифровая обработка данных выполнена с применением специализированных программ Pix4Dmapper, Agisoft Metashape и ArcGIS, позволивших создать надежную 3D-модель подземного пространства. Предварительный результат обработки (Pix4Dmapper и ArcGIS) приведен на рис. 10.2, при этом дно подземной полости отображено синим цветом и имеет поднятие под кратером за счет большого объема упавшей породы. Диапазон изменений глубин дна кратера (по вертикали) составил 28—32 м, размер кратера на поверхности земли — 24×25 м, размер внутреннего жерла кратера эллиптической формы — около 15×18 м.

Полученная цифровая 3D-модель кратера С17 имеет большое значение для дополнительного подтверждения модели формирования полости в массиве подземного льда, газодинамического механизма образования МБП и мощного выброса газа

с разрушением сводовой части подземной полости и самого МБП, впервые сформулированной и обоснованной в работах [2; 3]. Также отметим, что аэрофотосъемка подобных подземных пространств ранее никогда не выполнялась.

### Заключение

Для гигантских размеров Арктики не существует альтернатив геоэкологическому мониторингу опасных эндогенных и экзогенных процессов, кроме как с применением данных дистанционного зондирования Земли из космоса, а также беспилотных летательных аппаратов. При этом анализ данных ДЗЗ должен сопровождаться валидацией на основе экспедиционных исследований.

В ходе трехлетнего применения цифровых данных ArcticDEM (тайлы и стрипы) получена принципиально новая информация о распространении опасных объектов в Арктике и подтверждена возможность успешного 4D-мониторинга изменений их геометрических размеров. Разностные ЦМР позволяют в полувеличенном режиме четко выявлять кардинальные изменения наземных объектов, связанных

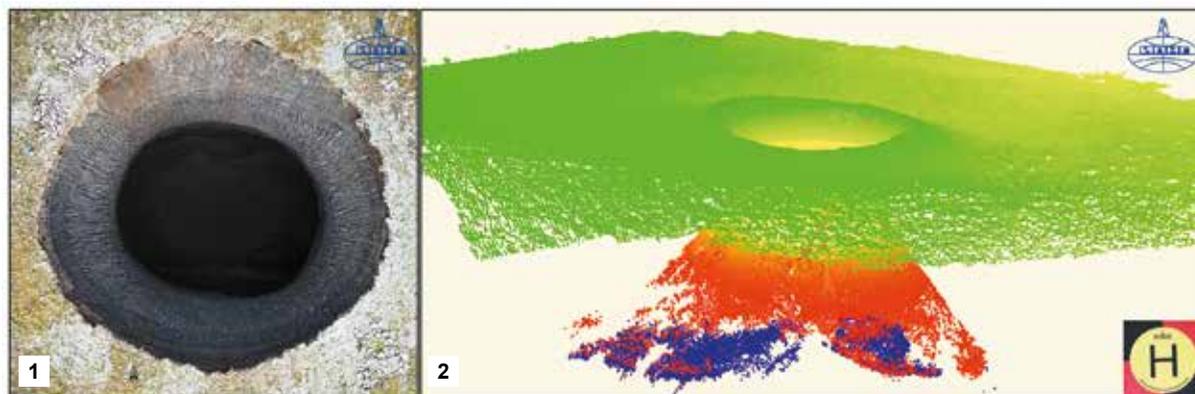


Рис. 10. Ямальский кратер выброса газа С17 (1) и трехмерная модель поверхности Земли и подземной полости (2) по данным аэрофотосъемки с БПЛА (И. В. Богоявленский, 26 августа 2020 г.)  
Fig. 10. Yamal crater of gas blowout C17 (1) and 3D model of the ground surface and underground cavity (2) according to aerial photography from UAV (I. V. Bogoyavlensky, August 26, 2020)

## Новые технологии освоения Арктики

со взрывными преобразованиями МБП (положительные структуры) в кратеры выбросов газа (негативные структуры). Вместе с тем даже в седьмой версии ArcticDEM обнаружены серьезные погрешности в расчетах ЦМР (смещения в пространстве вплоть до отрицательной области и др.), которые ограничивают полную автоматизацию и требуют активного участия в процессе интерпретаторов, проводящих согласно ГОСТ Р 50779.80—2013 проверку по альтернативным признакам AAA (attribute agreement analysis) [21].

Применительно к задачам региональных исследований опасных процессов ретроспективный 4D-мониторинг открытых данных ЦМР ArcticDEM позволяет обнаружить ранее неизвестные объекты мощных выбросов газа с образованием кратеров. Причем этот процесс может быть легко формализован в виде автоматизированного выявления этих объектов с дополнительной верификацией специалистами. На практике полностью автоматизировать этот процесс практически невозможно из-за существенных ошибок в построениях ЦМР на данном этапе. Отметим, что ряд выявленных объектов возможных выбросов газа (более 20) прошел или проходит стадию валидации по альтернативным данным, в первую очередь экспедиционных исследований, и по мере завершения работ полученные результаты будут опубликованы.

С помощью беспилотного летательного аппарата на Ямале проведены аэрофотосъемки и построены 3D-модели ряда кратеров выбросов газа. Впервые выполнена подземная аэрофотосъемка пространства кратера выброса газа, свидетельствующая о существовании до взрыва газонасыщенной термокарстовой полости в массиве подземного льда, что дополнительно подтверждает правильность модели газодинамического механизма, предложенной авторами в 2014 г. [2; 3].

Относительно катастрофы 1980—1987 гг. на Кумжинском месторождении еще раз отмечаем, что его разработка должна быть в особом государственном приоритете, обусловленном вопросами экологической, экономической и национальной безопасности России. С учетом «Основ государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года» его безопасное освоение находится в сфере выполнения задач по снижению угроз жизнедеятельности человека и ликвидации накопленного вреда окружающей среде ([1, п. 14.в, п. 15.в].

Работы выполнялись 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, ПАО «НОВАТЭК» и ПАО «Газпром» за постоянную поддержку экспедиционных исследований. Авторы

благодарны PGC, ESRI, NGA и NSF — инициаторам и создателям уникальной цифровой базы данных открытого доступа ArcticDEM, позволившей получить дополнительную важную информацию об опасных событиях и объектах в Арктике.

## Литература/References

1. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года. — Утв. указом Президента РФ от 5 марта 2020 г. № 164. — URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/45255>.  
Osnovy gosudarstvennoy politiki Rossiiskoi Federatsii v Arktike na period do 2035 goda. [Fundamentals of the state policy of the Russian Federation in the Arctic for the period up to 2035]. Utv ukazom Prezidenta RF ot 5 marta 2020 g. no. 164. Available at: <http://kremlin.ru/acts/bank/45255>. (In Russian).
2. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала // Бурение и нефть. — 2014. — № 9. — С. 13—18.  
Bogoyavlensky V. I. Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. Voronki Yamala. [The threat of catastrophic gas blowouts from the Arctic cryolithozone. Yamal craters]. Burenie i neft', 2014, no. 9, pp. 13—18. (In Russian).
3. Богоявленский В. И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов: Монография // Труды Вольного экон. о-ва. — 2014. — Т. 182, № 3. — С. 12—175.  
Bogoyavlensky V. I. Arktika i Mirovoi okean: sovremennoe sostoyanie, perspektivy i problemy osvoeniya resursov uglevodorodov. Monografiya. [Arctic and the World Ocean: current state, perspectives and challenges of hydrocarbon production. Monograph]. Trudy Volnogo ekon. o-va, 2014, vol. 182, no. 3, pp. 12—175. (In Russian).
4. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Дистанционное выявление участков поверхностных газопроявлений и газовых выбросов в Арктике: полуостров Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 3 (23). — С. 4—15.  
Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Distantionnoe vyyavlenie uchastkov poverkhnostnykh gazoprovyavlenii i gazovykh vybrosov v Arktike: poluostrov Yamal. [Remote detection of near surface gas shows and blowouts in the Arctic: Yamal peninsula]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2016, no. 3 (23), pp. 4—13. (In Russian).
5. Богоявленский В. И., Бойчук В. М., Перекалин С. О. и др. Катастрофа Кумжи // Бурение и нефть. — 2017. — № 1. — С. 18—24.  
Bogoyavlensky V. I., Boychuk V. M., Perekalin S. O., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N. Katastrofa Kumzhi. [Kumzha disaster]. Burenie i neft', 2017, no. 1, pp. 18—24. (In Russian).
6. Богоявленский В. И., Перекалин С. О., Бойчук В. М. и др. Катастрофа на Кумжинском газоконденсатном месторождении: причины, результаты, пути устра-

- нения последствий // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 1 (25). — С. 32—46.
- Bogoyavlensky V. I., Perekalin S. O., Boychuk V. M., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N. Katastrofa na Kumzhinskoye gazokondensatnom mestorozhdenii: prichiny, rezul'taty, puti ustraneniya posledstviy. [Kumzhinskoye Gas Condensate Field Disaster: reasons, results and ways of eliminating the consequences]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2017, no. 1 (25), pp. 32—46. (In Russian).
7. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В. Природные и техногенные угрозы при поиске, разведке и разработке месторождений углеводородов в Арктике // Минер. ресурсы России. Экономика и управление. — 2018. — № 2. — С. 60—70.
- Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V. Prirodnye i tekhnogennye ugrozy pri poiske, razvedke i razrabotke mestorozhdeniy uglevodorodov v Arktike. [Natural and technogenic threats in prospecting, exploration and development of hydrocarbon fields in the Arctic]. Miner. resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie, 2018, no. 2, pp. 60—70. (In Russian).
8. 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., Kargina T. N., Kishankov A. V. Degazatsiya Zemli v Arktike: distantsionnye i ekspeditsionnye issledovaniya katastroficheskogo Seyakhinskogo vybrosa gaza na poluostrove Yamal. [Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the Seyakha catastrophic gas blowout on the Yamal Peninsula]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2019, no. 1 (33), pp. 88—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105. (In Russian).
9. 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. Degazatsiya Zemli v Arktike: kompleksnyye issledovaniya rasprostraneniya bugrov pucheniya i termokarstovykh ozer s kraterami vybrosov gaza na poluostrove Yamal. [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, 2019, no. 4 (36), pp. 52—68. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68. (In Russian).
10. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Никонов Р. А. 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., Bogoyavlenskiy I. V., Kargina T. N. Degazatsiya Zemli v Arktike: genезis prirodnoy i antropogennoy emissii metana. [Earth degassing in the Arctic: the genesis of natural and anthropogenic methane emissions]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2020, no. 3 (39), pp. 6—22. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-6-22. (In Russian).
11. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Гор. пром-сть. — 2020. — 1 (149). — С. 97—118. — DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118.
- Bogoyavlensky V. I. Prirodnye i tekhnogennye ugrozy pri osvoenii mestorozhdeniy goryuchikh iskopaemykh v kriolitosfere Zemli. [Natural and technogenic threats in fossil fuels production in the Earth cryolithosphere]. Gor. prom-st', 2020, no. 1 (149), pp. 97—118. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118. (In Russian).
12. 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. III International Conference "Geology of the Caspian Sea and adjacent areas" EAGE, Baku, Azerbaijan, 16—18 October 2019, 5 p.
13. 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. 22 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences10060215>.
14. Сизов О. С. Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // Геоматика. — 2015. — № 1. — С. 53—68.
- Sizov O. S. Distantsionniy analiz posledstviy poverkhnostnykh gazoprovyavleniy na severe Zapadnoy Sibiri. [Remote analysis of the surface gas shows consequences in the north of Western Siberia]. Geomatika, 2015, no. 1, pp. 53—68. (In Russian).
15. Бондур В. Г., Кузнецова Т. В. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. — 2015. — № 4. — С. 30—43. — DOI: 10.7868/S020596141504003X.
- Bondur V. G., Kuznetsova T. V. Vyyavlenie gazovykh sipov v akvatoriyakh arkticheskikh morey s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya. [Detection of gas seeps in the Arctic offshore areas, using remote sensing data]. Issled. Zemli iz kosmosa, 2015, no. 4, pp. 30—43. DOI: 10.7868/S020596141504003X. (In Russian).
16. Porter C., Morin P., Ian H. et al. ArcticDEM. Harvard Dataverse. 2018, V1. DOI: 10.7910/DVN/OHHUKH.

17. Kizyakov A., Zimin M., Sonyushkin A. et al. Comparison of Gas Emission Crater Geomorphodynamics on Yamal and Gydan Peninsulas (Russia), Based on Repeat Very-High-Resolution Stereopairs. *Remote Sens.* 2017, 9, 1023. DOI: 10.3390/rs9101023.
18. Kizyakov A., Leibman M., Zimin M. et al. Gas Emission Craters and Mound-Predecessors in the North of West Siberia, Similarities and Differences. *Remote Sens.* 2020, 12, 2182. DOI: 10.3390/rs12142182.
19. Никонова А. Н. Трансформация пойменных экосистем дельты Печоры в зоне влияния Кумжинского газоконденсатного месторождения (Ненецкий автономный округ) // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2015. — № 5. — С. 117—129.
- Nikonova A. N. Transformatsiya poymennykh ekosistem del'ty Pechory v zone vliyaniya Kumzhinskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya (Nenetskiy avtonomnyy okrug) [Transformation of floodplain ecosystems of the Pechora delta in the zone of influence of the Kumzhinsky gas condensate field (Nenets Autonomous Okrug)]. *Izv. RAS, Ser. geogr.*, 2015, no. 5, pp. 117—129. (In Russian).
20. Шиманский В. К., Зырнер Ю. И., Макарова И. П. и др. Оценка экологического состояния окружаю-

- щей среды территории Коровинского и Восточно-Коровинского месторождений, включая территорию причала. — СПб.: ВНИГРИ, 2004. — 308 с.
- Shimanskiy V. K., Zyrner Yu. I., Makarova I. P. et al. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya okruzhayushchey sredy territorii Korovinskogo i Vostochno-Korovinskogo mestorozhdeniy, vklyuchaya territoriyu prichala. [Assessment of the ecological state of the environment of the territory of the Korovinsky and Vostochno-Korovinsky fields, including the berth area]. St. Petersburg, VNIGRI, 2004, 308 p. (In Russian).
21. ГОСТ Р 50779.80—2013. Статистические методы. Анализ совпадения результатов проверок по альтернативному признаку. — М.: Стандартинформ, 2014. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200107474>.
- GOST R 50779.80—2013. Statisticheskiye metody. Analiz sovpadeniya rezul'tatov proverok po al'ternativnomu priznaku. [Statistical methods. Attribute agreement analysis]. Moscow, Standartinform, 2014. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200107474>. (In Russian).

### Информация об авторах

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

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

### Библиографическое описание данной статьи

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.

## DIGITAL TECHNOLOGIES FOR REMOTE DETECTION AND MONITORING OF THE DEVELOPMENT OF HEAVING MOUNDS AND CRATERS OF CATASTROPHIC GAS BLOWOUTS IN THE ARCTIC

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

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

The article was received on September 2, 2020

### Abstract

In the course of the three years work in the Arctic with ArcticDEM digital elevation models (DEM), the researchers have obtained fundamentally new results on the natural catastrophic transformations of the landscapes of the Yamal Peninsula in the process of powerful gas blowouts and explosions. They have proved the possibility of detecting gas-explosive objects and processes during regional 4D monitoring based on DEM processing, and in the course of the retrospective 4D monitoring, have identified a number of potential gas blowout objects. The authors have identified disadvantages and proved the need for further improvement of the ArcticDEM data. They have built 3D-models of the areas of catastrophic induced gas blowouts during the drilling of exploration wells in the Arctic, including the Kumzhinskoye field. Using an unmanned aerial vehicle (drone DJI Mavic Pro), the researchers carried out aerial photography and built 3D models of a number of gas blowout craters. For the first time in Yamal, they performed an underground aerial photography of the gas blowout crater space C17, indicating the existence of a gas-saturated cavity in the underground ice mass before the explosion, which additionally confirms the model of the gas-dynamic mechanism proposed by the authors in 2014.

**Keywords:** *Arctic, permafrost, cryosphere, Earth remote sensing (ERS), satellite images, aerial photography, unmanned aerial vehicle, digital elevation models (DEM), 4D-monitoring, perennial heaving mounds, thermokarst lakes, gas-saturated cavities, gas blowout craters, gas-dynamic mechanism.*

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

The authors are grateful to the government of the Yamal-Nenets Autonomous District, PJSC NOVATEK and PJSC Gazprom for their considerable aid during expeditionary research. The authors are grateful to PGC, ESRI, NGA and NSF — the initiators and creators of the unique digital open access database ArcticDEM, which made it possible to obtain additional important information about dangerous events and objects 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: vib@pgc.su.

**Bogoyavlensky Igor Vasilyevich**, 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.

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

### Bibliographic description

**Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N., Nikonov R. A.** Digital technologies for remote detection and monitoring of the development of heaving mounds and craters of catastrophic gas blowouts in the Arctic. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 4 (40), pp. 90—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-90-105. (In Russian).

© Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N., Nikonov R. A., 2020