

## РЕЗУЛЬТАТЫ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ И ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КРУПНЫХ ВЫБРОСОВ ГАЗА НА ЯМАЛЕ В РАЙОНЕ БОВАНЕНКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

**В. И. Богоявленский**

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН, ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

**И. В. Богоявленский, Р. А. Никонов**

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 13 июля 2017 г.

*Приведены результаты изучения дегазации недр Арктики, проявляющейся в регионах наличия многолетнемерзлых пород в виде мощных выбросов газа с формированием кратеров. Исследования базируются на анализе материалов аэрокосмической съемки и данных экспедиции в 2015 г. на кратер газового выброса, обнаруженный южнее Бованенковского месторождения. По данным эхолокации и GPS построена трехмерная модель дна озера, в которое превратился кратер, и окружающей суши. Исследовано 80 новообразованных объектов в его окрестностях, включая небольшие озера вокруг основного кратера. По космическим снимкам проведен мониторинг изменения береговой линии с момента первого обнаружения кратера до настоящего времени.*

**Ключевые слова:** Арктика, выбросы газа, кратеры, воронки газового выброса, полуостров Ямал, Бованенковское месторождение, криолитозона, многолетнемерзлые породы, термоабразия, булгуннях, покмарки.

### Введение

Вопросам изучения природной дегазации недр и поиску выходов на поверхность Земли газа и нефти, называемых сипами (seeps), уделяется большое внимание в работах отечественных и зарубежных авторов [1—19]. Сипы нефти и газа во многих случаях являются прямыми индикаторами присутствия промышленных залежей углеводородов (УВ), и благодаря им открыто множество месторождений, одним из ярких представителей которых является уникальное морское месторождение Мексики Cantarell. Многолетнемерзлые породы (ММП), существующие на большей части территории России и на мелководных акваториях арктических морей, сдерживают вертикальную миграцию УВ, так как они являются малопроницаемой покрывкой. Ниже подошвы ММП и внутри нее могут формироваться значительные скопления газа в свободном или гидратном состояниях.

В среднем плейстоцене — голоцене (последние 10—12 тыс. лет) за счет активной трансгрессии моря значительные территории арктической суши оказались затопленными и превратились

в обширный мелководный шельф, что привело к постепенной деградации ставших субмаринными ММП. Несмотря на это, мощность ММП на глубинах моря до 100—110 м может достигать 500—900 м, особенно вблизи островов и банок. Деградация ММП на шельфе Арктики приводит к мощной дегазации недр за счет разрушения мерзлотной покрывки для залежей свободного газа и диссоциации (разложения) залежей газовых гидратов в криолитозоне [2—6; 13—15].

На акваториях морей России и в Мировом океане обнаружено огромное количество неглубоких залежей газа (gas pockets) и покмарок (rockmarks) — округлых углублений в рельефе дна нередко с брусстерами, сформированными выброшенной потоком газа породой. Такие объекты привлекают большое внимание многих ученых, подробно описаны в широко известной монографии A. Judd и M. Hovland [17] и в ряде других работ [1—8; 12; 15—17, 19 и др.]. При высокочастотных геоакустических исследованиях над покмарками нередко наблюдаются струи газа, получившие название «газовые факелы» (gas flares). В геоинформационной системе (ГИС) «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО»), созданной и постоянно развиваемой в Институте проблем нефти

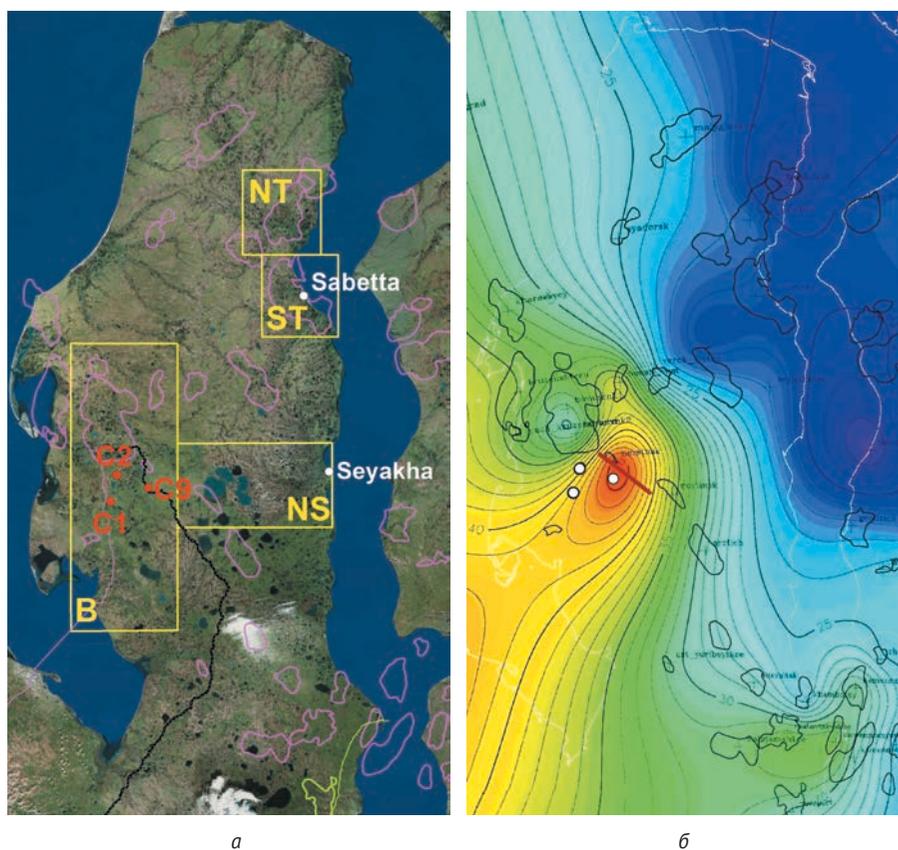


Рис. 1. Расположение кратеров выбросов газа С1, С2 и С9 на Ямале (а) и срез трехмерной модели температур на уровне 1000 м (б)

и газа РАН (ИПНГ РАН), собрана информация о более чем 20 тыс. природных и техногенных сипов нефти и газа [2—9; 15]. Очевидно, что абсолютное большинство этих сипов имеет природное происхождение, не зависит от временных изменений климата (особенно на дне Мирового океана), но, возможно, в значительной степени связано с голоценовым потеплением (особенно на суше и мелководье Циркумарктического региона).

В 2014—2016 гг. в заполярных зонах Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) и Красноярского края на полуостровах Ямал и Гыданский выявлено около десяти гигантских воронок — кратеров газового выброса. Для изучения перечисленных объектов Некоммерческим партнерством «Российский центр освоения Арктики» (РЦОА), созданным в 2014 г. по распоряжениям президента России В. В. Путина и губернатора ЯНАО Д. Н. Кобылкина рядом научных учреждений, в том числе Институтом проблем нефти и газа РАН и РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, в 2014—2017 гг. организовано более десяти экспедиций, благодаря которым собран большой объем фактических данных [2—9; 12; 15]. Наибольший объем информации накоплен для пяти кратеров, которым в ГИС «АМО» присвоены коды С1, С2, С3, С4 и С9. При образовании кратеров С2 и С4 разлет крупных кусков породы достигал 300—900 м, что свидетельствует об огромной энергии выбросов газа и их потенциальной опасности для

жизнедеятельности человека, особенно в зонах расположения инфраструктуры нефтегазовых промыслов. Самым известным по количеству экспедиций и научных публикаций является кратер С1. Первые две работы, посвященные его исследованию, опубликованы в сентябре-октябре 2014 г. [2; 3].

#### **Бованенковский регион исследований дегазации недр**

Три кратера (С1, С2 и С9) обнаружены вблизи объектов ПАО «Газпром» — в 10—30 км южнее Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) (рис. 1а, участок В), при этом кратер С1 находится всего в 3,5 км от газопровода высокого давления «Бованенково — Ухта» (рис.1а, розовая линия), а кратер С9 — в 1,6 км от новой железной дороги на Ямале «Обская — Карская» (рис. 1а, черная линия) [2—6; 13; 15]. Кроме того, на основе дешифрирования аэрокосмических данных на Ямале нами выявлено более 250 термокарстовых озер с многочисленными крупными подводными кратерами выбросов газа, большей частью расположенными в пределах Южно-Тамбейского и Северо-Тамбейского участков исследований (рис. 1а, участки ST и NT). В ряде озер количество кратеров измеряется многими сотнями и даже тысячами [4—6; 8; 12; 15]. С момента обнаружения всех аномальных объектов, связанных с выбросами газа, в ИПНГ РАН в сотрудничестве с Госкорпорацией «Роскосмос» ведется

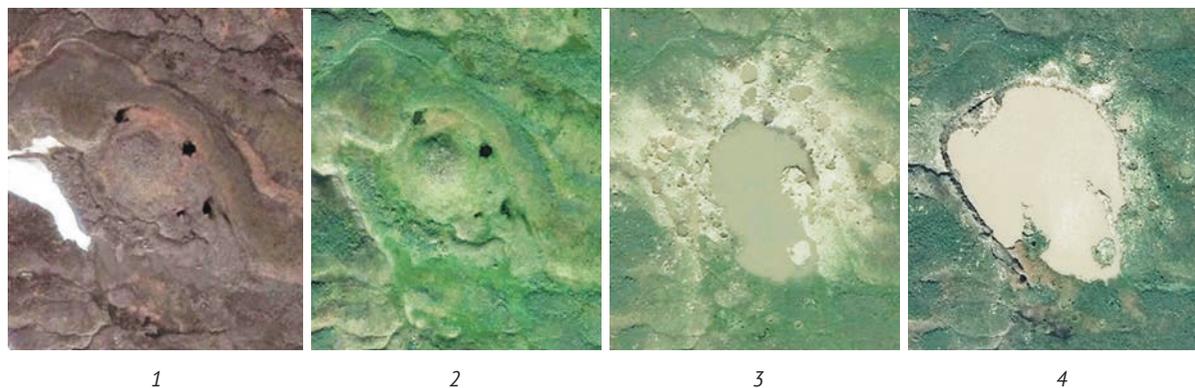


Рис. 2. Космические снимки объекта С2: 1 – QB 4 июля 2009 г., 2 – QB 30 июля 2010 г., 3 – WV-2 21 июля 2013 г., 4 – WV-3 27 июня 2016 г.

мониторинг их состояния с использованием материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), включая отечественный спутник «Ресурс-П» [8; 13].

Анализ сорбированного газа в кайнозойских отложениях Бованенковского НГКМ на глубине 0—220 м, проведенный в ООО «ТюменНИИгипрогаз», показал широкий диапазон изменений изотопного состава углерода метана  $\delta^{13}\text{C}$  от  $-54\text{‰}$  до  $-76\text{‰}$ , а ниже до глубины 350 м  $\delta^{13}\text{C}$  меняется от  $-43,5\text{‰}$  до  $-57\text{‰}$  [10]. Результаты исследований изотопного состава гелия (до 0,005% от объема газа) и углерода метана, отобранных из ряда грифонов на Уренгойской площади, говорят о его поступлении из глубоких (1—3 км) горизонтов [2; 3; 11]. На наш взгляд, все это свидетельствует о весьма вероятном подтоке в криолитозону в районе взорвавшихся объектов С1, С2 и С9 флюидов УВ из верхнемеловых отложений и в первую очередь из сеноманской газовой залежи, расположенной в районе Бованенковского НГКМ на глубинах 500—680 м, всего на 300 м ниже подошвы ММП [3].

### Экспедиционные и камеральные исследования района газового выброса С2

Впервые объект С2 был выявлен сотрудниками вертолетного отряда «Ямал Авиа», после чего он был идентифицирован нами на космоснимке WorldView (WV) 21 июля 2013 г. в виде продолговатого озера размером 100×60 м, вокруг которого наблюдались многочисленные (более 35) небольшие озера округлой формы диаметром до 8 м с брусчатыми выброшенной породы. Ретроспективный анализ космоснимков Quick Bird (QB) 2009—2010 гг. (рис. 2) свидетельствует, что на месте изучаемого объекта в 2009—2010 гг. существовал крупный бугор пучения диаметром около 60—63 м и площадью около 3 тыс. м<sup>2</sup>, называемый на якутском языке булгуннях, а на эскимосском — пинго (Pingo) [1—6; 15; 18]. Первая информация о данном объекте, полученная на основе дешифрирования космоснимков и рекогносцировочной экспедиции в июле 2015 г., была опубликована в работах [5; 6 и 15]. При этом

не вызывало сомнений, что на месте булгуннях С2 произошел один или несколько выбросов газа, в результате которых он оказался разрушен, на его месте образовалось озеро, а окружающий ландшафт получил значительные повреждения за счет выброшенных взрывом кусков ледяного ядра и мерзлой породы.

Благодаря поддержке руководства ЯНАО 8 июля 2015 г. состоялась рекогносцировочная экспедиция на полуостров Ямал, организованная РЦОА и ИПНГ РАН [6]. В ходе экспедиции проводился облет на вертолете ряда объектов, обнаруженных в ИПНГ РАН на основе дешифрирования космоснимков, наиболее интересными из которых являются озера, расположенные в центре локальных поднятий, вероятно — бывшие булгуннях. При этом на наиболее значимые объекты осуществлялись краткосрочные высадки, в ходе которых делались экспресс-анализы глубин озер с помощью компактного эхолота Deeper и радиоуправляемого малогабаритного катера с эхолотом JABO 2b. Среди изучаемых объектов однозначно выделялось озеро С2, вокруг которого наблюдались многочисленные небольшие озера со следами выброшенной породы, а в его северной части с высоким крутым (до 6—8 м) берегом под маломощным (1—5 м) почвенным покровом было обнаружено протяженное (около 40 м) обнажение подземного пласта кристалльно чистого льда. Лед растапливался и подмывался относительно теплой (около 9°C) водой озера, за счет чего сформировались ледовые козырьки. В связи с явной уникальностью объекта С2 было принято решение о проведении многодневной экспедиции, состоявшейся в конце августа — начале сентября 2015 г. В ней участвовали И. В. Богоявленский, Р. А. Никонов и сотрудник Уральского регионального поисково-спасательного центра МЧС России А. С. Патаржинский<sup>1</sup>.

Уже во время высадки из вертолета 31 августа были видны значительные изменения в северной

<sup>1</sup> Фотографии, помещенные в статью, выполнены членами авторского коллектива.



Рис. 3. Обследование объекта С2 из вертолета (4 сентября 2015 г.)



Рис. 4. Панорамное изображение озера С2 с фрагментами выброшенной породы (4 сентября 2015 г.)

части озера С2, произошедшие после 8 июля. За счет растапливания массива льда водой озера произошло обрушение огромного массива льда и покрывавшей его почвы на протяжении около 25 м вдоль берега (рис. 3, 4 и 5), что также видно на космоснимке WV 27 июня 2016 г. (см. рис. 2.4). Объем обрушившейся породы оценен примерно в 200—250 м<sup>3</sup>. Термоабразионные процессы продолжались непрерывно в течение всего теплого периода. Во время экспедиции ее участники наблюдали крупную трещину в массиве льда и мерзлой породы на северо-восточном берегу озера, которая в течение пяти дней постоянно увеличивалась. В результате крупный кусок льда с покрывавшими его остатками почвы обрушился в озеро. Также наблюдалось непрерывное обрушение меньших кусков льда и породы в северо-восточной и северной частях берега. Отметим, что проведение полевых работ было осложнено плохой погодой — практически непрерывным сильным ветром, частым дождем и низкой температурой воздуха (в основном от 0 до +7°C).

По состоянию на 1 сентября 2015 г. озеро С2 имело размеры 120×95 м и было заполнено водой до

самой кромки пологой части юго-западного берега, из которой по слабовыраженному руслу вытекал небольшой ручей. На противоположном крутом берегу высотой до 3 м к озеру примыкает овраг с крутопадающими краями глубиной до 2—3 м, по которому в озеро впадает ручей (рис. 3 и 4). Руслу впадающего и вытекающего ручьев, возможно, приурочены к единому разлому, диагонально секущему дно озера. Именно в таких зонах в хасыреях часто формируются бугры пучения с ледяным ядром, с вероятной подпиткой по разлому грунтовыми водами (булгуннях — пинго — гидролакколит).

Во время экспедиции был исследован крупный сектор территории (полигон) радиусом до 500 м, прилегающий к озеру С2. При этом фиксировались особенности ландшафта и новоявленные повреждения поверхности земли (GPS-координаты и фотографии), выполнялись промеры глубин основного и сопутствующих озер и небольших сухих и обводненных впадин взрывного или ударного генезиса (эхолот Deeper), отбирались образцы льда, воды и инородных фрагментов пород, выброшенных взрывом. В связи с отсутствием обуглившихся фрагментов



Рис. 5. Массивное обрушение части северного берега озера С2 в результате термоабразии и остатки бруствера на переднем плане (4 сентября 2015 г.)

растительности с высокой степенью вероятности можно говорить о пневматическом характере взрыва без воспламенения газа. Всего обследовано 80 новоявленных объектов, показанных на рис. 6. Кроме того, на удалении 430 м от озера С2 в северо-восточном направлении (за пределами границ рис. 6) обнаружено небольшое обнажение погребенного массива льда.

По характеру распространения кусков выброшенной породы (белесый цвет суглинистой породы вокруг озера) и небольших новоявленных озер и углублений можно говорить о специфической направленности взрыва. Наибольшее их количество обнаружено вокруг основного озера и в северо-западной части полигона (см. рис. 6). Максимальное удаление новоявленных объектов от эпицентра взрыва (центра булгуньяха) достигает 370 м. Края многих углублений активно зарастают различными растениями. В наиболее крупных углублениях (рис. 7) проводился промер глубины до слоя вечной мерзлоты при помощи металлического щупа. Она изменялась от 0,4 до 1,1 м и более. Отметим, что на объекте С1 никаких углублений в почвенном покрове не обнаружено, что хорошо согласуется с прогнозом зимнего времени взрыва булгуньяха С1 по данным дешифрирования

космоснимков (март 2014 г.) [13; 15], когда летящие куски мерзлой породы и льда падали на замороженную поверхность земли. Наличие многочисленных углублений на полигоне С2 (рис. 6 и 8) позволяет говорить о том, что взрыв произошел в теплое время года, когда приповерхностная сильно увлажненная часть почвы (местами заболоченная) была в талом состоянии (середина июня — конец сентября).

Большая часть новоявленных озер и углублений имеет правильную округлую форму, но некоторые из них, найденные на значительных удалениях от эпицентра взрыва, вытянуты в радиальном направлении, их брустверы несимметричны, а основной объем выброшенной или выдавленной почвы и растительности находится в наиболее удаленной части. Растительность (трава, мох, ягель, мелкий кустарник и пр.) во многих случаях перевернута корнями вверх. Все это свидетельствует о падении крупных кусков льда и породы, летевших по дуге из эпицентра взрыва (см. рис. 8). По причине отсутствия кусков почвы в новоявленных впадинах можно утверждать, что это был в основном лед, который вскоре растаял.

В непосредственной близости от основного озера имеется также несколько небольших впадин с отверстиями правильной круглой формы на дне (рис. 9).

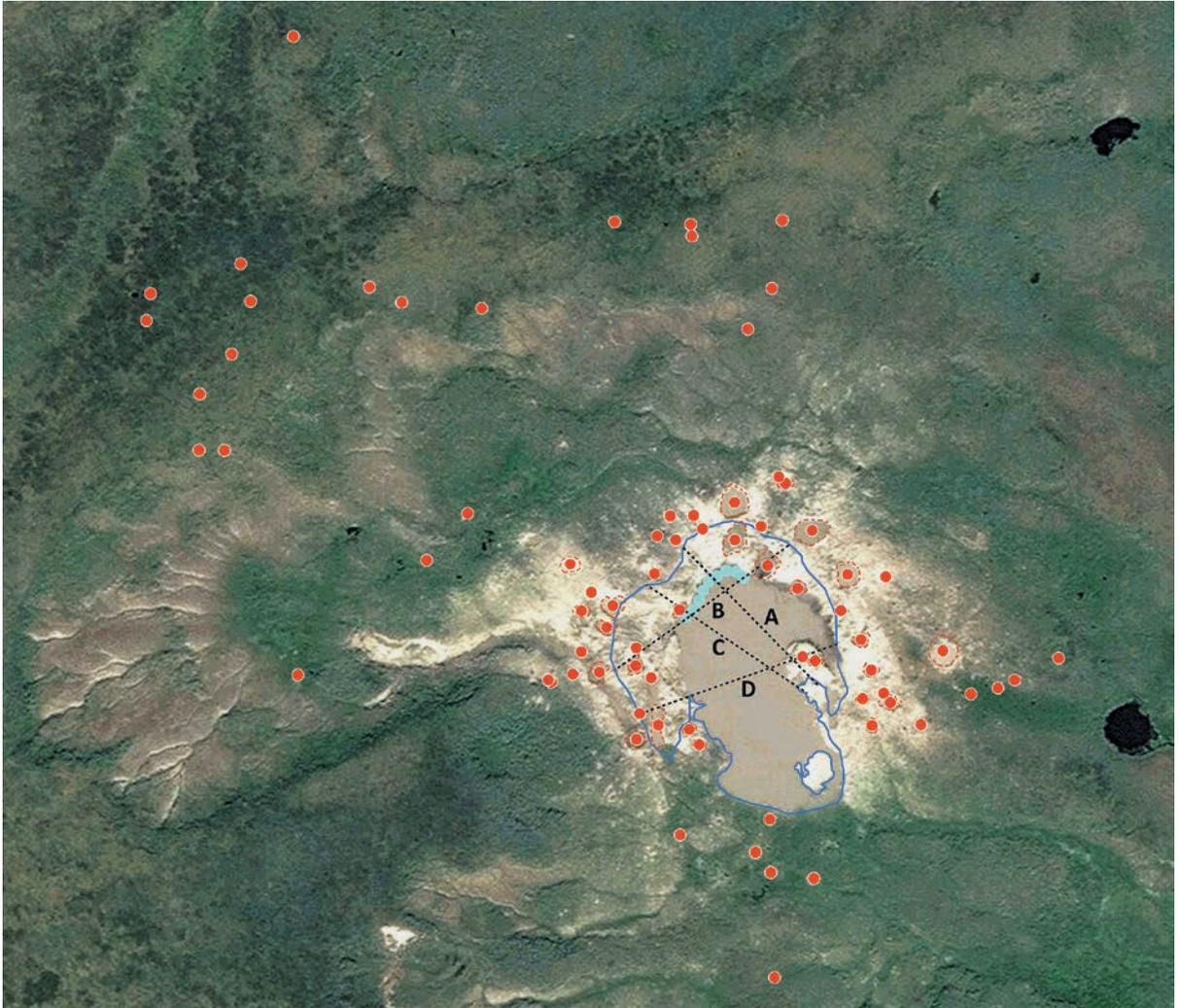


Рис. 6. Космоснимок WV-2 21 июля 2013 г. района озера С2 с объектами исследований в 2015 г. Условные обозначения: красные пунктирные линии и точки – крупные и мелкие впадины в рельефе местности, голубая линия – положение берега во время экспедиции, голубые точки – обнажения льда, черный пунктир – профили эхолотирования



Рис. 7. Два фотоснимка небольших водоемов с брусверами выброшенной породы в восточной части объекта С2 (4 сентября 2015 г.)

Возможно, они образовались в результате недавних выходов газа. Благодаря пластичности глинистых отложений такие каналы в короткое время могут закрыться. Увидеть их глубинное продолжение можно

было бы с помощью георадаров, которых, к сожалению, в экспедиции не было.

В результате комплексного анализа космоснимков, авторских фотографий из вертолета



Рис. 8. Три фотоснимка заводненных углублений ударного характера в северной части объекта С2 (4 сентября 2015 г.)

и результатов наземных измерений было отслежено отступление береговой линии основного озера С2 в период с 21 июля 2013 г. до 27 июня 2017 г. Для этих целей в систему ArcGIS были загружены космические снимки WV-2, WV-3 и QB с разрешением до 1 м и привязанные к плану фотографии из вертолета. Также в ГИС-проект были добавлены результаты полевых измерений, информация о местах обнаружения новоявленных объектов с данными GPS. На космоснимке WV-3 27 июня 2016 г. (рис. 10) показаны положения контура булгуньяха и пяти разновременных береговых линий (0 и 1—5). Максимальная скорость отступления береговой черты наблюдается в северном и северо-западном направлениях, где присутствует погребенный массив пластового льда, который растапливается относительно теплой водой (до 9°C), после чего происходит обрушение больших участков крутого берега. Скорость достигает 46 м за 49 месяцев, или 13,5 м в год (в основном за три летних месяца), что существенно выше, чем в большей части прибрежных зон полуостровов Ямал и Гыданский. Возможно, виной этому были два жарких лета 2015 и 2016 гг. При этом лето 2016 г. было объявлено в регионе аномально жарким. В южном направлении положение пологого берега было стабильно до середины 2016 г., но после

этого произошло затопление значительного участка в юго-западной части озера размерами 22×34 м. Площадь зеркала воды за 37 месяцев увеличилась в 2,1 раза (с 4370 до 9170 м<sup>2</sup>), а за 49 месяцев — в 2,8 раза (до 12 410 м<sup>2</sup>).

В экспедиции были проведены промеры глубин озера С2 эхолотом Деерер с надувной лодки по четырём профилям, расположение которых показано на рис. 6 и 10. На рис. 11 приведены зарегистрированные эхограммы профилей А и В, на которых наблюдаются существенные изменения глубины дна вдоль профилей. Максимальная глубина дна не превысила 4 м. Глубокое жерло кратера обнаружено не было, возможно, из-за того, что оно оказалось завалено упавшими после взрыва кусками породы (см. центральную часть рис. 11А). Оцифрованные профили эхолотирования и данные GPS-съёмки на прилегающем полигоне исследований были загружены в ГИС-проект, что позволило создать трехмерную модель рельефа (рис. 12). Эта модель была построена с интерполяцией в модуле ArcScene программного пакета ArcGIS. По ней можно проследить рельеф дна озера и наглядно увидеть наиболее крупные впадины на дне и прилегающей суше.

При эвакуации с объекта С2 участники экспедиции высадились для рекогносцировочного



Рис. 9. Отверстия возможных газоподводящих каналов в небольших водоемах вокруг озера С2

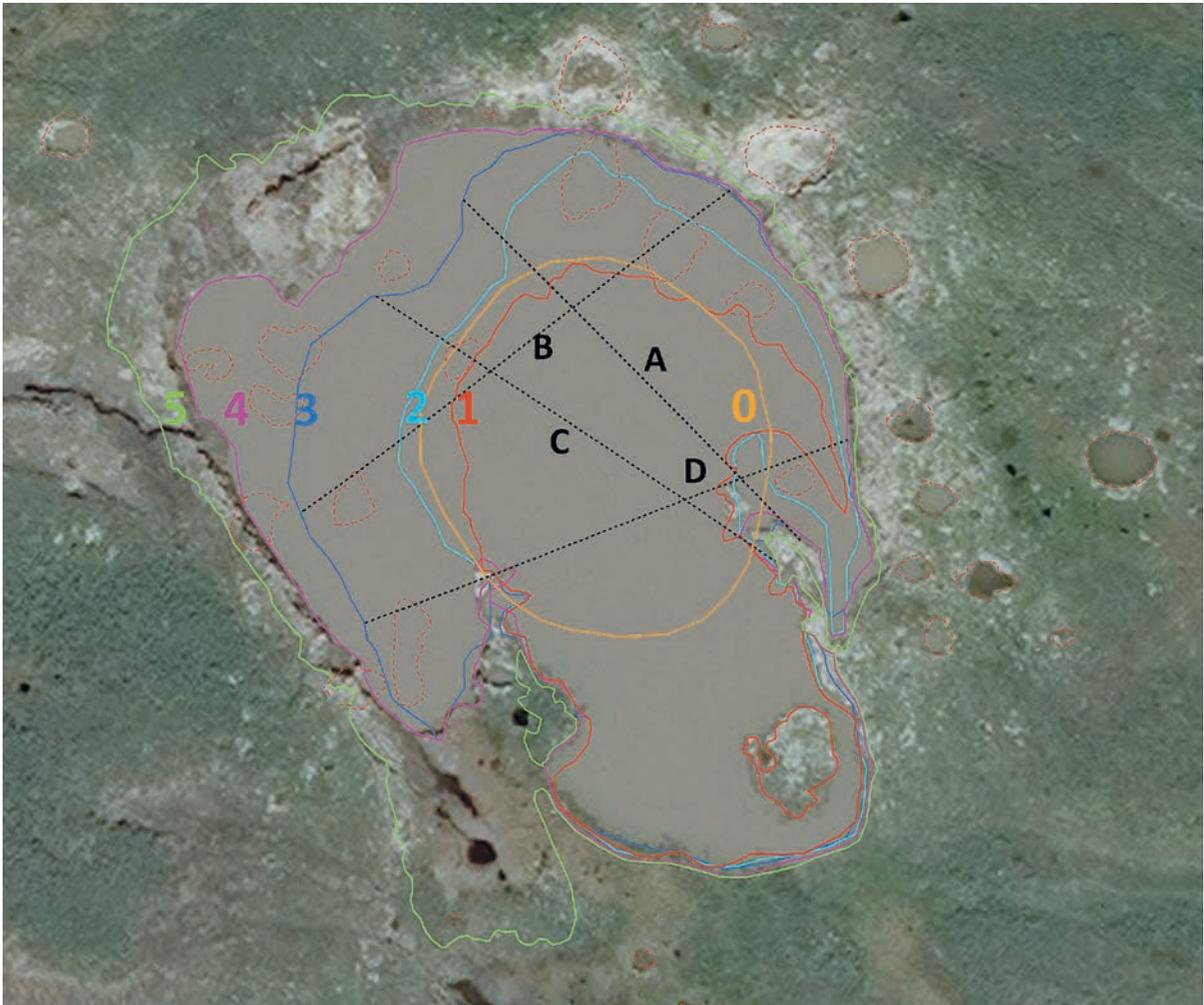


Рис. 10. Положение четырех профилей эхолотирования (А, В, С, D) и динамика изменений обстановки и контуров береговой линии озера С2.  
Условные обозначения: внешний контур булгуньяха 0 – QВ 4 июля 2009 г., озеро 1 – WV-2 21 июля 2013 г., 2 – вертолет лето 2014 г., 3 – вертолет 8 июля 2015 г., 4 – WV-3 27 июня 2016 г. (фотографическая основа рисунка), 5 – WV-1 27 июня 2017 г.

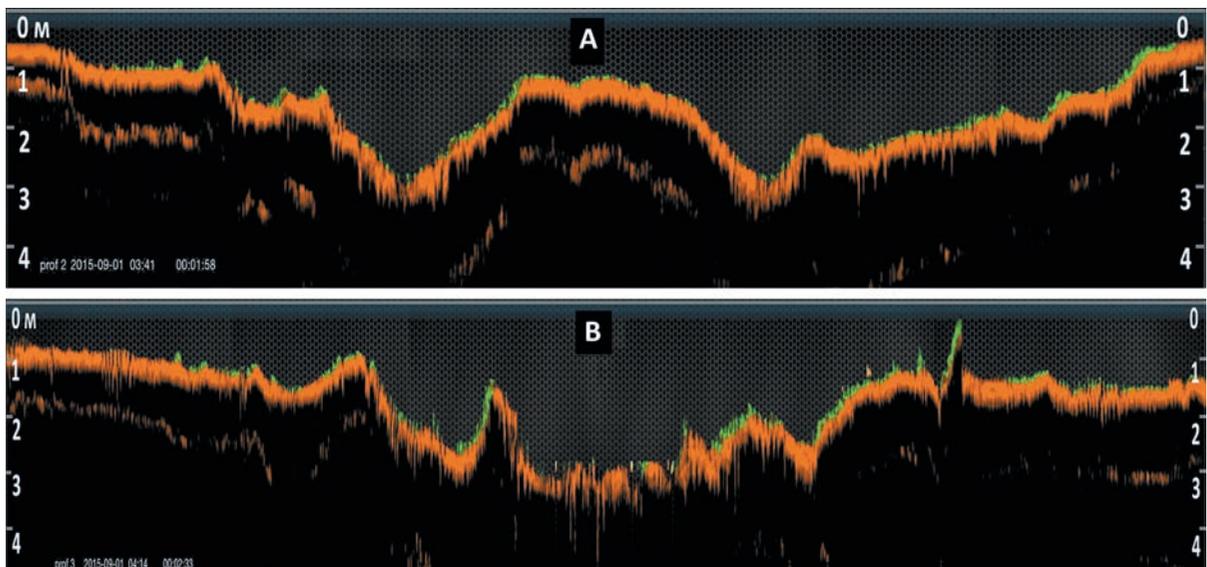


Рис. 11. Батиметрические разрезы озера С2 по профилям А и В

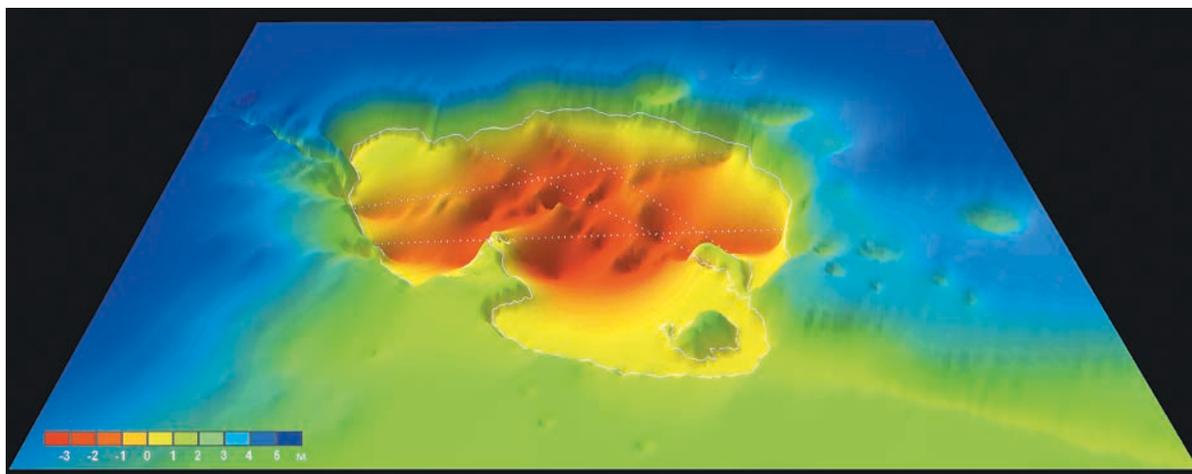
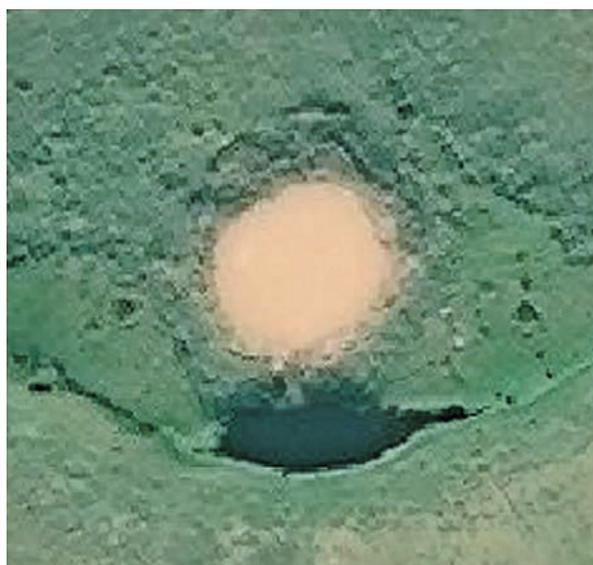


Рис. 12. Трехмерная модель рельефа дна и берегов полигона исследований



*а*



*б*



*в*

Рис. 13. Кратер выброса газа С9: *а* – фотография из вертолета 27 апреля 2013 г. (С. А. Никитенко), *б* – космоснимок WV-2 7 августа 2015 г., *в* – панорамная фотография с бруствера 4 сентября 2015 г.

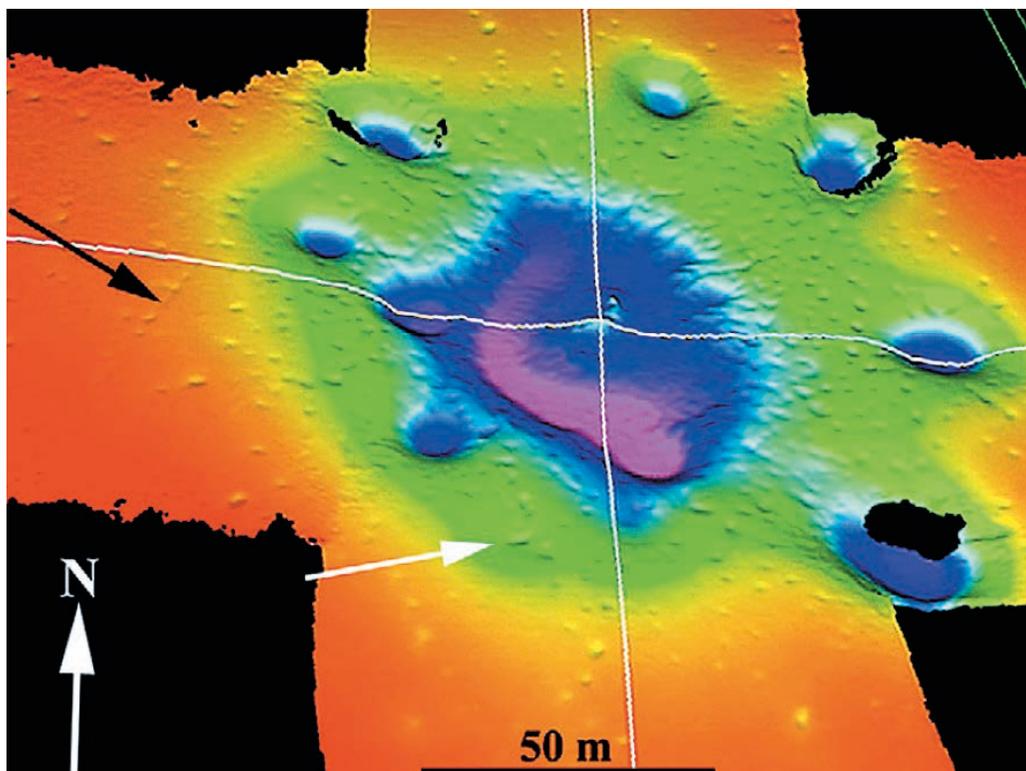


Рис. 14. Вид цифровой модели рельефа дна для одной из серий «семейств покмарок» в Норвежской котловине рядом с месторождением Тролль [17]

обследования кратера выброса газа С9 (рис. 13), находящегося в 10 км западнее С2 всего в 1,6 км от железной дороги «Обская — Карская». Первоначально кратер С9 был обнаружен пилотом «Ямал Авиа» С. А. Никитенко в сильно занесенном снегом виде 27 апреля 2013 г. По состоянию на август-сентябрь 2015 г. кратер был почти заполнен водой и превратился в озеро. Судя по брустверу выброшенной породы и нескольким более мелким углублениям в почве от упавших кусков выброшенного льда, можно с высокой вероятностью предположить, что выброс газа на объекте С9 произошел в летнее время 2012 г. (как и на кратере С2).

Также промежуточным результатом экспедиции стало фотографирование с борта вертолета и внесение в ГИС-проект координат обнаруженных в ходе полетов озер с многочисленными кратерами газовых выбросов на дне.

#### **Взгляд на выброс газа на объекте С2 из-за рубежа**

В 2015 г. широко известный норвежский ученый Мартин Ховланд (М. Novland), работающий в Университете Бергена и компании «Statoil», прислал нам интересные комментарии с приложенными иллюстрациями по интерпретации опубликованных нами в журнале «GEOExPro» материалов по образованию кратеров на полуостровах Ямал и Гыданский, включая материалы рекогносцировочной

экспедиции в июле 2015 г. на объект С2 [15]. М. Ховланд на основе опыта работы в Мировом океане предположил, что на объекте С2 небольшие углубления вокруг основного озера также являются кратерами газовых выбросов. В качестве подтверждающего примера он привел цифровую модель рельефа для одного «семейства покмарок» в Северном море в Норвежской котловине рядом с месторождением Тролль (рис. 14), опубликованную в 2010 г. в [17]. Это семейство состоит из центральной самой большой («родительской») покмарки, вокруг которой расположены восемь крупных и несколько сотен мелких покмарок. Дальнейшие исследования показали, что центральная покмарка образовалась из трех или четырех слившихся воедино относительно крупных покмарок. Также отметим, что в центре родительской покмарки находится возвышение, состоящее из аутигенного карбоната метанового происхождения (MDAC), колонизированного глубокowodными кораллами и гигантскими двустворчатыми моллюсками, указывающими на продолжающееся выделение поровой воды [17].

Причина формирования покмарок-спутников, как считает М. Ховланд [17], может заключаться в диффузионном осаждении метана в родительской покмарке и закупоривании канала выхода, вследствие чего газ мог начать выходить через другие каналы и формировать покмарки-спутники. Потом и они



Рис. 15. Авторы в районе экспедиции на объекте С2

постепенно закупоривались осаждающимися карбонатами, вызывая формирование соседних. М. Ховланд назвал это самозакупоривающейся системой сипов газа. По его мнению, такие же семьи кратеров от выбросов газа могли образоваться и на Ямале, включая кратер С2, вокруг которого наблюдаются несколько похожих на покмарки впадин (кратеров-спутников), заполненных водой (см. рис. 2, 6 и 10).

### Заключение

Первоначально в процессе анализа космоснимков мы были практически уверены в том, что на объекте С2 произошла серия выбросов газа, сформировавших большой и ряд небольших кратеров. После экспедиции мы пришли к выводу, что еще рано говорить об однозначном установлении идентичного механизма формирования всех новоявленных объектов вокруг кратера газового выброса С2, так как по полевым данным большинство (возможно, что все) из них без сомнения образовались в результате падения кусков льда и мерзлой породы, выброшенных при взрыве. Кроме того, районы развития ММП на суше и акваторий Мирового океана вносят свою специфику в процесс дегазации недр, а также в форму кратеров — покмарок.

Если говорить о примере М. Ховланда из Норвежской котловины, то нам кажется более реалистичной модель закупоривания жерла кратера взорванной выхлопом газа породой, часть которой всегда падает назад и может надолго его перекрыть, пока давление газа, накапливающегося в «газовой трубе» (газоподводящем канале) или в «газовом кармане», не прорвет образовавшуюся в жерле покрышку. При этом газу может быть легче прорваться через

новый канал, чем пробить покрышку старого, что приводит к формированию кратеров (покмарок) спутников. Именно такой механизм часто действует в процессе грязевого вулканизма и при извержениях стратовулканов.

Таким образом, мы не ставим точку в проведенных исследованиях объекта газового выброса С2 и считаем необходимым продолжить полевые работы, включая георадарную съемку сформировавшихся разномасштабных озер с целью проверки гипотезы наличия газоподводящих каналов.

Авторы благодарят: правительство ЯНАО и лично губернатора Д. Н. Кобылкина и его заместителя А. В. Мажарова за постоянное содействие научным исследованиям в Арктике; пилотов «Ямал Авиа» за прекрасную работу в сложных условиях Арктики, поиск и предоставление информации об аномальных объектах (рис. 15); коренное население Севера за информацию об изменениях в геоэкологической обстановке; Мартина Ховланда за внимательный анализ с интерпретацией наших материалов и предоставленные материалы по дегазации в Норвежской котловине.

### Post Scriptum

Летом 2017 г., когда данная статья была уже сдана в редакцию, стало известно о двух новых кратерах выброса газа С11 и С12, образовавшихся на Ямале в 2017 г. При этом оба выброса сопровождались воспламенением газа. Авторы побывали в новой экспедиции и собрали важный фактический материал, который будет исследован и опубликован в дальнейшем.

## Литература

1. Баранов Б. В., Дозорова К. А., Саломатин А. С. Покмарки восточного склона острова Сахалин // Вестн. КРАУНЦ. Сер. «Науки о Земле». — 2011. — № 2 (18). — С. 31—43.
2. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // Бурение и нефть. — 2014. — № 9. — С. 11—16.
3. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. — Ч. 2 // Бурение и нефть. — 2014. — № 10. — С. 4—8.
4. Богоявленский В. И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов: Монография // Тр. Вольного экон. о-ва России. — 2014. — Т. 182, № 3. — С. 12—175.
5. Богоявленский В. И. Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // Бурение и нефть. — 2015. — № 6. — С. 4—10.
6. Богоявленский В. И., Мажаров А. В., Пушкарёв В. А., Богоявленский И. В. Выбросы газа из криолитозоны полуострова Ямал // Бурение и нефть. — 2015. — № 8. — С. 8—13.
7. Богоявленский В. И., Керимов В. Ю., Ольховская О. О. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Охотское море // Нефтяное хоз-во. — 2016. — № 6. — С. 43—47.
8. 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—13.
9. Богоявленский В. И., Тупышев М. К., Титовский А. Л., Пушкарёв В. А. Рациональное природопользование в районах распространения газовых залежей в верхней части разреза // Вести газовой науки [ООО «Газпром ВНИИГАЗ»]. — 2016. — № 2. — С. 160—164.
10. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. — Т. 2: Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / Под общ. ред. Ю. В. Баду, Н. А. Гафарова, Е. Е. Подборного. — М.: ООО «Газпром экспо», 2013. — 424 с.
11. Кузин И. Л. О природе аномальных озёр — показателей углеводородов в глубоких горизонтах осадочного чехла // Проблемы оценки новых зон нефтегазоаккумуляции в основных продуктивных толщах Западной Сибири. — СПб.: ВНИГРИ, 1992. — С. 129—137.
12. Лаверов Н. П., Богоявленский В. И., Богоявленский И. В. Фундаментальные аспекты рационального освоения ресурсов нефти и газа Арктики и шельфа России: стратегия, перспективы и проблемы // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 2 (22). — С. 4—13.
13. Сизов О. С. Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // Геоматика. — 2015. — № 1. — С. 53—68.
14. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИГАЗ, 2009. — 192 с.
15. Bogoyavlensky V. Gas Blowouts on the Yamal and Gydan Peninsulas // GEOExPro [London]. — 2015. — Vol. 12, № 5. — P. 74—78.
16. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. — Cambridge, 2007. — 475 p.
17. Hovland M., Hegglund R., De Vries M. H., Tjelta T. I. Unit-pockmarks and their potential significance for predicting fluid flow // Marine and Petroleum Geology. — 2010. — 27. — P. 1190—1199.
18. 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, № 3. — P. 1—53.
19. May D. A., Monaghan J. J. Can a single bubble sink a ship? // American J. of Physics. — 2003. — Vol. 71, Iss. 9. — P. 842—849.

---

## Информация об авторах

**Богоявленский Василий Игоревич**, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по науке, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), заведующий кафедрой геоэкологии, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), 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.

**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., Никонов Р. А. Результаты аэрокосмических и экспедиционных исследований крупных выбросов газа на Ямале в районе Бованенковского месторождения // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3 (27). — С. 4—17. DOI 10.25283/2223-4594-2017-3-4-17

## RESULTS OF AERIAL, SPACE AND FIELD INVESTIGATIONS OF LARGE GAS BLOWOUTS NEAR BOVANENKOVO FIELD ON YAMAL PENINSULA

Bogoyavlenskiy V. I.

Oil and gas research Institute of the Russian Academy of Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

Bogoyavlenskiy I. V., Nikonov R. A.

Oil and gas research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

### Abstract

The paper shows the study of Arctic subsoil degassing in regions with permafrost resulting in gas blowout craters formation. The study is based on aerial and field data from expedition on one of the gas blowout craters near Bovanenkovo field. A 3D-model of the lake formed in the place of the crater and surrounding land made from echo sounding and GPS data is shown. 80 newly formed objects surrounding the crater studied, including small lakes around the main crater. The results of satellite monitoring of crater shoreline change since the first foundation till the present day is presented in the paper.

**Key words:** Arctic, gas blowout, craters, gas blowout cones, Yamal peninsula, Bovanenkovo field, cryolithozone, permafrost rocks, thermal abrasion, boogunyah, pockmarks.

### Acknowledgements

Authors would like to thank:

The Governor of the Yamal-Nenets Autonomous District D.N. Kobylkin, Deputy Governor of the Yamal-Nenets Autonomous District A.V. Mazharov and all the Government of Yamal-Nenets Autonomous District for the continuous support of scientific studies in the Arctic.

All the Yamal Avia pilots for the given pictures and information about the anomalous objects in the Yamal Tundra. The locals for providing the information about the changing Arctic environment.

Martin Hovland for his analysis and interpretation of the crater origin and given information about the Sea of Norway subsoil degassing.

### References

1. Baranov B. V., Dozorova K. A., Salomatin A. S. Pokmarki vostochnogo sklona ostrova Sakhalin. [Pockmarks of the Eastern slope of Sakhalin island]. Vestn. KRAUNTS. Ser. "Nauki o Zemle", 2011, no. 2 (18), pp. 31—43. (In Russian).
2. Bogoyavlenskiy V. I. Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. [The threat of catastrophic gas blowouts from the Arctic permafrost]. Bureniye i neft, 2014, no. 9, pp. 11—16. (In Russian).
3. Bogoyavlenskiy V. I. Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. Ch. 2. [The threat of catastrophic gas blowouts from the Arctic permafrost. Pt. 2]. Bureniye i neft, 2014, no. 10, pp. 4—8. (In Russian).
4. Bogoyavlenskiy V. I. Arktika i Mirovoy okean: sovremennoye sostoyaniye. perspektivy i problemy osvoyeniya resursov uglevodorodov. [Arctic and the World Ocean: current state, perspectives and challenges of hydrocarbon production]. Tr. Volnogo ekon. o-va Rossii, 2014, vol. 182, no. 3, pp. 12—175. (In Russian).
5. Bogoyavlenskiy V. I. Vybrosov gaza i nefti na sushe i akvatoriyakh Arktiki i Mirovogo okeana. [Oil and gas emissions on land and offshore areas of the Arctic and World Ocean]. Bureniye i neft, 2015, no. 6, pp. 4—10. (In Russian).
6. Bogoyavlenskiy V. I., Mazharov A. V., Pushkarev V. A., Bogoyavlenskiy I. V. Vybrosov gaza iz kriolitozony poluostrova Yamal. [Gas emissions from the Yamal peninsula permafrost]. Bureniye i neft, 2015, no. 8, pp. 8—13. (In Russian).
7. Bogoyavlenskiy V. I., Kerimov V. Yu., Olkhovskaya O. O. Opasnyye gazonasyshchennyye obyekty na akvatoriyakh Mirovogo okeana: Okhotskoye more. [Dangerous gas-saturated objects in the world ocean: the Sea of Okhotsk]. Neftyanoye khoz-vo, 2016, no. 6, pp. 43—47. (In Russian).
8. Bogoyavlenskiy V. I., Sizov O. S., Bogoyavlenskiy I. V., Nikonov R. A. Distantionnoye vyavleniye uchastkov poverkhnostnykh gazoprovyavleniy i gazovykh vybrosov v Arktike: poluostrov Yamal. [Remote detection of near surface gas shows and blowouts in Arctic: Yamal peninsula]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2016, no. 3 (23), pp. 4—13. (In Russian).
9. Bogoyavlenskiy V. I., Tupysev M. K., Titovskiy A. L., Pushkarev V. A. Ratsionalnoye prirodopolzovaniye v rayonakh rasprostraneniya gazovykh zalezhey v verkhney chasti razreza. [Rational environment management in the areas with near surface gas deposits]. Vesti gazovoy nauki [OOO "Gazprom VNIIGAZ"], 2016, no. 2, pp. 160—164. (In Russian).
10. Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdeniy poluostrova Yamal. T. 2. Kriosfera Bovanenkovskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya. [Yamal oil-gas-condensate fields cryosphere. Vol. 2.

- Bovanenkovo oil-gas-condensate field cryosphere]. Pod obshch. red. Yu. V. Badu, N. A. Gafarova, E. E. Podbornogo. Moscow, OOO "Gazprom ekspso", 2013, 424 p. (In Russian).
11. Kuzin I. L. O prirode anomalnykh ozer — pokazateley uglevodorodov v glubokikh gorizontakh osadochnogo chekhla. Problemy otsenki novykh zon neftegazonakopleniya v osnovnykh produktivnykh tolshchakh Zapadnoy Sibiri. [On the nature of blue lakes — the indicators of hydrocarbons in deep layers of sedimentary cover. Challenges of new oil and gas accumulation zones estimation in the main productive layers of Western Siberia]. St. Petersburg, VNIGRI, 1992, pp. 129—137. (In Russian).
12. Laverov N. P., Bogoyavlenskiy V. I., Bogoyavlenskiy I. V. Fundamentalnyye aspekty ratsionalnogo osvoyeniya resursov nefti i gaza Arktiki i shelfa Rossii: strategiya, perspektivy i problemy. [Fundamental aspects of Russian Arctic and offshore oil and gas rational resource production: strategy, perspectives and challenges]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2016, no. 2 (22), pp. 4—13. (In Russian).
13. Sizov O. S. Distantnyy analiz posledstviy poverkhnostnykh gazoproyavleniy na severe Zapadnoy Sibiri. [Remote analysis of surface oil and gas shows effects on the North of Western Siberia]. Geomatika, 2015, no. 1, pp. 53—68. (In Russian).
14. Yakushev V. S. Prirodnyy gaz i gazovyye gidraty v kriolitozone. [Natural gas and gas hydrates in permafrost]. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (In Russian).
15. Bogoyavlenskiy V. Gas Blowouts on the Yamal and Gydan Peninsulas. GEOExPro [London], 2015, vol. 12, no. 5, pp. 74—78.
16. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. Cambridge, 2007, 475 p.
17. Hovland M., Heggland R., De Vries M. H., Tjelta T. I. Unit-pockmarks and their potential significance for predicting fluid flow. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27, pp. 1190—1199.
18. Mackay J. R. Pingo Growth and collapse. Tuktoyaktuk Peninsula Area, Western Arctic Coast, Canada: a long-term field study. Géographie physique et Quaternaire, 1998, vol. 52, no. 3, pp. 1—53.
19. May D. A., Monaghan J. J. Can a single bubble sink a ship? American J. of Physics, 2003. vol. 71, iss. 9, pp. 842—849.

---

### Information about the authors

**Bogoyavlenskiy Vasily Igorevich**, Corresponding member of RAS, Doctor of Technical Science, Deputy Director for Science, Oil and gas research Institute of the RAS (3, Gubkina St., Moscow, 119333, Russia), the Head of the Chair of Geoecology, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Pr., Moscow, 119991, Russia), e-mail: vib@pgc.su.

**Bogoyavlenskiy Igor Vasilyevich**, Researcher, Oil and gas research Institute of the RAS (3, Gubkina St., Moscow, 119333, Russia), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

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

### Bibliographic description

**Bogoyavlenskiy V. I., Bogoyavlenskiy I. V., Nikonov R. A.** Results of aerial, space and field investigations of large gas blowouts near Bovanenkovo field on Yamal peninsula. The Arctic: ecology and economy, 2017, no. 3 (27), pp. 4—17. (In Russian). DOI 10.25283/2223-4594-2017-3-4-17