

ДЕГАЗАЦИЯ ЗЕМЛИ В АРКТИКЕ: КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ И ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР С КРАТЕРАМИ ВЫБРОСОВ ГАЗА НА ПОЛУОСТРОВЕ ЯМАЛ

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)

О. С. Сизов

АО «Российские космические системы», 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, ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

Т. Н. Каргина

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

Статья поступила в редакцию 29 августа 2019 г.

Впервые на основе комплексного дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли из космоса и экспедиционных исследований в Арктике на полуострове Ямал выявлено 7185 многолетних бугров пучения и 415 термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на дне. Проведен анализ плотности их распространения и выявлены зоны повышенного риска для жизнедеятельности человека. Установлено, что на данном уровне изученности наибольшая плотность распространения опасных объектов приурочена к восточной части полуострова Ямал, а экстремальные зоны находятся на Сеяхинском, Северо-Тамбейском и Южно-Тамбейском участках исследований. В ряде кратерных озер доказана непрерывная и/или периодическая эмиссия (включая мощные выбросы) газа, свидетельствующая о вулканическом генезисе извержений. Обоснована необходимость расширения регионов исследований и их детализации в районах жизнедеятельности человека и мониторинга процессов динамики криолитосферы и дегазации.

Ключевые слова: Арктика, Ямал, бугор пучения, термокарстовое озеро, дегазация, выбросы газа, эмиссия газа, воспламенение, взрывы газа, кратер, воронка, грязевой вулкан, криовулкан, мониторинг, дистанционное зондирование Земли, данные ДЗЗ.

Введение

Более чем полувековой опыт изучения и освоения ресурсов углеводородов в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) свидетельствует об огромном потенциале ее недр и высокой уязвимости экосистемы. Необходимость расширения минерально-сырьевой базы России, сохранения достигнутых

объемов добычи нефти и газа наряду с «сохранением и обеспечением защиты природной среды Арктики, ликвидации экологических последствий хозяйственной деятельности в условиях возрастающей экономической активности и глобальных изменений климата» зафиксирована в «Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу», утвержденных Президентом РФ 18 сентября 2008 г.

© Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В., Никонов Р. А., Каргина Т. Н., 2019

(№ Пр-1969) и в ряде других основополагающих государственных документов.

Глобальное потепление на Земле активизирует термодинамические процессы в криолитосфере Земли с деградацией многолетнемерзлых пород (ММП) и диссоциацию залежей газогидратов, являющихся экранами (покрышками) на пути субвертикальной миграции газа. Это приводит к высвобождению огромных объемов накопившегося газа (преимущественно метана) в свободном и гидратном состояниях, усиливает трансформацию криогенных ландшафтов Арктики и несет новые угрозы жизнедеятельности человека [1—41]. Широкомасштабное увеличение эмиссии метана в атмосферу влияет на изменения климата на Земле и может привести к необратимым катастрофическим последствиям глобального уровня. Перечисленные выше процессы требуют полноценного научного изучения. Выявление, мониторинг развития и снижение угроз от опасных природных и природно-техногенных явлений в литосфере, криосфере, гидросфере и атмосфере — важнейшие задачи современной науки. При этом особо актуальное направление — изучение процессов дегазации Земли, имеющих в Арктике «взрывную» специфику.

Гигантские размеры малонаселенных территорий и прилегающих акваторий арктических и субарктических регионов России (более 60% площади страны) выдвигают новые требования к мониторингу состояния поверхности Земли и ее недр [2; 4; 6—9; 12 и др.]. Незаменимым инструментом изучения и мониторинга экологического состояния Земли, выявления и мониторинга развития опасных природных и природно-техногенных явлений в районах промышленных объектов, особенно в малолюдных регионах Арктики, является дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) аэрокосмическими методами [2; 4; 6—9; 12; 18; 21; 25; 27; 28; 33; 36 и др.].

Бугры пучения на суше Арктики

В зоне развития ММП широко распространена трансформация криолитосферы и природных ландшафтов в виде контрастных на фоне тундровой равнины растущих или деградирующих бугров морозного (криогенного) пучения и термокарстовых впадин (часто водоемов — озер), образующихся на просевших за счет протаивания пластовых льдов и высокольдистых ММП участках поверхности Земли. Эти явления в разной степени активности исследуются более 50 лет и опубликованы в работах многих отечественных и зарубежных ученых [1—11; 13—21; 23—25; 27; 28; 30—41 и др.]. Общеизвестно, что бугры пучения бывают инъекционного, сегрегационного (миграционного) и смешанного типов, а по продолжительности существования — многолетние и сезонные (однолетние). Несмотря на это, существуют различные обоснования их генезиса и применяемой терминологии, что порождает сложности систематизации. В зарубежной научной литературе

бугры пучения чаще всего называют пинго (Pingo — в переводе с инуитского языка — маленький холм), а в отечественной — булгуннях (в переводе с якутского — холм) и гидролакколит. Ю. К. Васильчук с соавторами выделяют миграционные бугры пучения (торфяной бугор) или пальза (palsa) как отдельный тип бугров, формирующихся в мерзлых торфяных массивах [13—15].

В данной работе основное внимание уделено многолетним буграм пучения (МБП), которые обычно имеют ледяное или ледогрунтовое ядро (линзу). В криолитозоне МБП с ледяным ядром формируются при промерзании поступающих через талики подмерзлотных/межмерзлотных артезианских вод (гидродинамический напор — открытая гидравлическая система) или промерзании талых высыхающих котловин бывших озер — хасыреев (закрытая гидростатическая система) [38]. Бугры пучения известны не только в АЗРФ (рис. 1), но и во многих других регионах развития ММП, включая Камчатку и Сахалин [13—15].

Самые крупные исследованные МБП достигают 400—750 м в диаметре и 30—70 м в высоту [13, с. 351; 36, с. 22]. В различных публикациях упоминается, что МБП могут расти в высоту со скоростью 2—3 см/год [14, с. 4] и даже 15—26 см/год [13, с. 26; 38, с. 22]. При неблагоприятных условиях МБП переходят в стадию деградации ледяного ядра (см. рис. 1.3 и 1.4), завершающуюся формированием термокарстовых озер. Возможно, что такой генезис имеет не одно, а оба образовавшиеся в разное время озера на рис. 1.4. Вокруг основания МБП во многих случаях наблюдаются заболоченные или заполненные открытой водой понижения формы рельефа, часто имеющие почти правильную кольцевую форму.

Широкую известность во всем мире получили пинго на канадском арктическом полуострове Туктояктук (Tuktoyaktuk) и сопредельных территориях побережья моря Бофорта на широте около 69—70° [38]. Популярность этой территории привела к тому, что в 1984 г. здесь был создан национальный парк Pingo National Landmark площадью около 16 км², в котором существуют 8 наиболее известных крупных пинго. Территория характеризуется наличием больших массивов погребенного льда мощностью до 10—40 м, а толщина ММП достигает 500—800 м. Активное изучение пинго в Канаде и США началось в послевоенные годы практически одновременно с нефтегазопроисковыми исследованиями. Один из наиболее признанных специалистов в данной области J. R. Maskau в ходе многолетних исследований на севере Канады на полуострове Туктояктук и сопредельных территориях обосновал существование около 1350 пинго [38].

Американские геологи G. Grosse и B. M. Jones при поддержке Национального управления по авиации и исследованию космического пространства NASA (National Aeronautics and Space Administration) провели большую работу по изучению МБП в азиат-

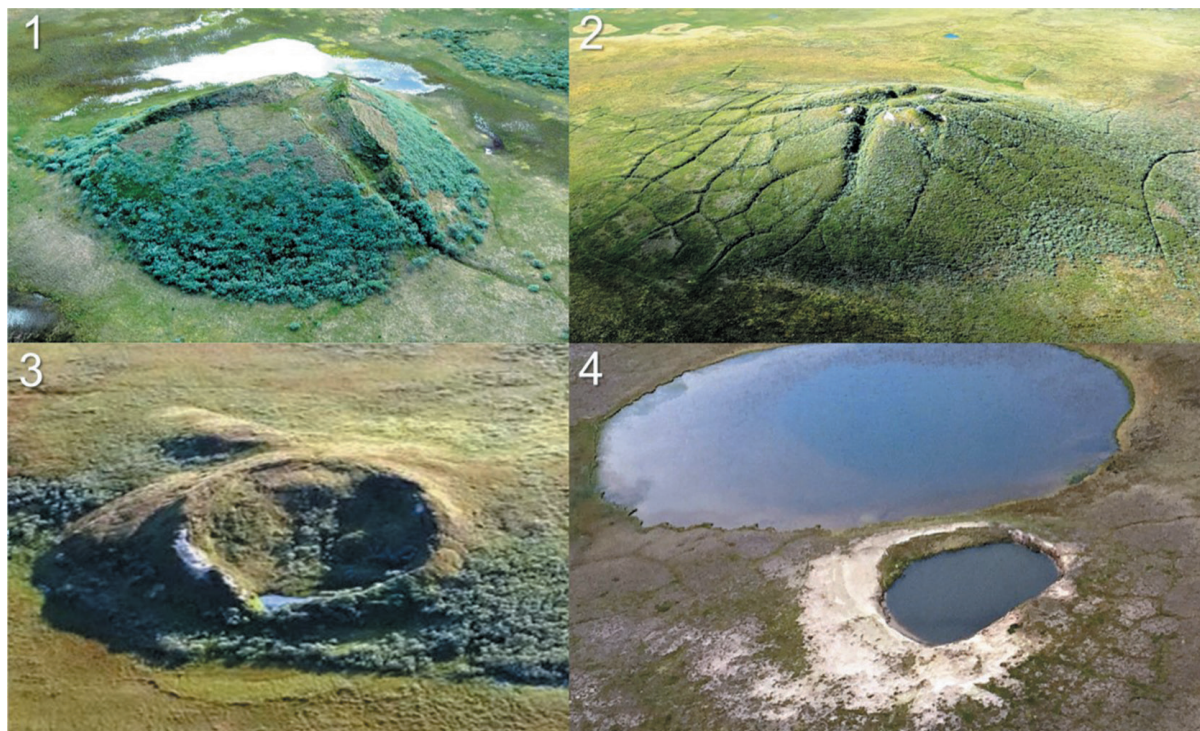


Рис. 1. Многолетние бугры пучения на полуострове Ямал в обычном (1, 2) и деградирующем (3, 4) состояниях (фото В. И. Богоявленского из вертолета в 2014–2015 гг.)
 Fig. 1. Perennial frost mounds on the Yamal Peninsula in regular (1, 2) and degrading (3, 4) states (photos from helicopter in 2014–2015 by V. I. Bogoyavlensky)

ской части российской территории Арктики (включая районы Якутии и Колымы). В результате они включили в «первую версию» созданной геоинформационной системы (ГИС) 6059 пинго, из которых большая часть (около 82%) расположена в тундре [33].

В основе своей работы G. Grosse и В. М. Jones использовали ставшие хорошо известными за рубежом (после распада СССР) топографические карты масштаба 1:200 000 (675 карт на общей площади 4 млн км²), созданные Военно-топографическим управлением Генерального штаба ВС СССР на основе дешифрирования аэроснимков 1970–1980-х годов. На топокартах МБП (булгуняхи, ледяные холмы и бугры) отмечены как важные элементы рельефа местности, при этом они были обнаружены на 231 карте из 675 [33]. После оцифровки МБП G. Grosse и В. М. Jones провели проверку созданной базы данных ГИС на шести участках по зимним (февраль–март) космоснимкам 2000–2007 гг. TerraLook/ASTER Геологической службы США (USGS) и NASA. Отметим, что МБП хорошо выделяются на зимних космоснимках по специфической форме ярко освещенной Солнцем одной стороны бугра и теневой — противоположной. На шести анализируемых участках было выявлено по топографическим картам 247 бугров, а по космоснимкам — 679 (в 2,75 раза больше). При этом положения 199 бугров подтвердились (это не значит, что оставшиеся 48 не существуют), а 480 были обнаружены впервые. Такое различие можно объяснить тем, что на кар-

тах масштаба 1:200 000 были показаны наиболее крупные МБП. Также возможно, что часть МБП была пропущена, так как на снимках во время отсутствия снега, когда выполнялась аэрофото съемка СССР, их сложнее выделять, чем на зимних аэрокосмоснимках.

В итоге с учетом различных публикаций по Западному полушарию [38 и др.], по утверждению G. Grosse и В. М. Jones, на Земле существует «около 11 тыс. пинго или более», что практически в два раза больше, чем было до их исследований [33, с. 29]. При этом по вышеуказанным данным на севере Западной Сибири зафиксировано 1620 МБП. Огромная работа G. Grosse и В. М. Jones по исследованию распространения МБП в АЗРФ и созданию по заказу NASA базы геоданных заслуживает внимания и уважения, а то, что она не была выполнена отечественными учеными, вызывает удивление и озабоченность. Возможно, это связано с недостаточным финансированием отечественной науки, хотя данные исследования однозначно имеют большое значение для научно-производственных и военных задач.

В 2011 г. сотрудниками ПАО «Газпром» [23] была опубликована упрощенная схема плотности распространения МБП, составленная при расчете их количества по отдельным листам карт масштаба 1:200 000 (площадь листа в среднем около 5500 км² для широт полуострова Ямал). Особенно важно, что авторы [23], обследовав ряд МБП в полевых условиях, пришли к выводу, что многие из них следует отнести к грязевым вулканам: «...Установлены мно-

гочисленные следы излияния грязи в виде мелких холмиков (грифоны). Отдельные потоки грязи образуют выраженные в рельефе формы, осложняющие склоны более крупных холмов. Вблизи холмов часто встречаются типичные «сальзы» — участки высачивания грязи без образования холма». Правомерность их вывода подтверждается рядом веских аргументов, включая изотопные свидетельства подтока к поверхности земли глубинных (юра-триас?) термокаталитических газов [11; 19].

Бугры пучения на акваториях Арктики

Кроме суши МБП существуют также на дне морей Арктики. Около 50 лет назад сейсмоакустическими исследованиями в море Бофорта было доказано существование МБП (PLF — Pingo-like feature), размеры которых достигают 400 м в диаметре и 30 м в высоту [40; 41]. После ряда дополнительных исследований несколько PLF были признаны активными грязевыми вулканами [39]. Подводный грязевой вулкан Naakon Mosby и множество других МБП обнаружены также в Норвежском, Баренцевом, Печорском и Карском морях [2; 7; 11; 21; 22; 24; 31; 34; 35].

Первые МБП (гидролакколиты) на шельфе российской Арктики были выявлены при сейсморазведке путем непрерывного сейсмопрофилирования в Печорском море к западу от острова Вайгач ОАО АМИГЭ в начале 1990-х годов [2; 7; 11; 21; 22]. В 1995 г. при бурении инженерно-геологической скважины с судна «Бавенит» ОАО АМИГЭ на одном из наиболее высоких поднятий в рельефе дна под шестиметровой толщей донных осадков обнаружен интервал ледогрунта мощностью более 90 м, являющийся по своей природе гидролакколитом [2; 7; 11]. При бурении на соседнем поднятии после небольшой (около 20 м) толщи ММП была вскрыта залежь газа, мощный выброс которого в водную толщу создал опасную аварийную ситуацию для бурового судна. Газирование продолжалось несколько суток с постепенным затуханием. Возможно, кроме вскрытия залежи свободного газа имелся дополнительный приток газа из разлагавшегося при нарушении термобарических условий газогидрата.

Исследования в Баренцевом море, проведенные учеными из Центра газовых гидратов, экологии и климата (CAGE) Норвежского университета Арктики (UIT), позволили сформулировать модель формирования подводных пинго, связанную с гидратообразованием и их диссоциацией (разложением) [30; 31]. При этом газогидраты создают непроницаемую покрывку в придонных отложениях, под которой скапливается газ в свободной форме. Растущее давление газа, мигрирующего по субвертикальным каналам (разломам и микротрещинам), приводит к формированию пинго — МБП. При достижении критического значения давления газа в пинго, превышающего прочностные характеристики газогидратной покрывки, происходит ее разрушение, выброс газа в водную толщу с формированием кратера с брусстером выброшенной породы.

Угрозы от бугров пучения

Бугры пучения (многолетние и сезонные) представляют интерес не только для науки, но и для проектирования безопасного функционирования нефтегазовых промыслов и их периферийной инфраструктуры, а также других промышленных и жилых объектов: «Формирование бугров пучения — это один из самых опасных процессов для длительно существующих линейных сооружений: дорог, взлетных полос аэродромов, нефте- и газопроводов и др.» [13, с. 46]; «Наиболее опасными процессами и явлениями в криолитозоне России считаются пучение и осадка свайных фундаментов, образование бугров пучения с деформирующим воздействием на инженерные сооружения» [1, с. 5]. Нам известен МБП на одном из месторождений Тазовского полуострова, явно угрожающий целостности газопровода (он его фактически «домкратит»). Специалисты ООО «Газпром добыча Ямбург» были вынуждены разработать комплекс технологий борьбы с сезонными буграми пучения (патент РФ № 2602538), который успешно внедрен в производство [1].

Давно известно, что бугры пучения могут взрываться [2; 6; 7; 16; 17]. Однако, судя по описаниям, большинство взрывов бугров пучения было вызвано ростом внутренних давлений за счет криогенных процессов (замерзания воды). При этом, несмотря на большой грохот, эти взрывы представляли угрозу возможными повреждениями выбрасываемыми кусками ледогрунта лишь на удалениях до первых десятков метров, а глубины воронок (кратеров) были небольшими (2—4 м) [16; 17].

Летом 2014 г. ситуация кардинально изменилась. Мировое научное сообщество было шокировано мощными взрывами в Арктике с образованием гигантских кратеров [2—5; 16; 18; 21; 25 и др.]. Исследования доказали, что они были вызваны выбросами газа, который в ряде случаев самовоспламенялся, что усиливало мощность пневматического выброса (выхлопа) газа. Разлет кусков выброшенной породы достигал 300—900 м, а глубины кратеров по разным данным — от 20—22 м (С3 и С12) до 50—100 м (С1, С4, С11) [2—9; 36]. Не будем останавливаться на деталях характеристики этих опасных событий — они уже описаны во многих работах [1—10, 16; 18; 21; 25; 27; 28; 36 и др.]. Однако для иллюстрации приведем космоснимки четырех объектов исследований на трех стадиях (МБП до взрыва, кратеры выбросов газа и образовавшиеся термокарстовые озера) с индексацией, принятой в ГИС «Арктика и Мировой океан» («АМО») (рис. 2): С1 — Бованенковский (1, 5 и 9), С3 — Антипаютинский (2, 6 и 10), С4 — Дерябинский (3, 7 и 11), С12 — Еркутинский (4, 8 и 12) [1—9].

Мониторинг перечисленных выше и других объектов выброса газа показал, что взорвавшиеся МБП характеризуются: различными геоморфологическими условиями образования, различной степенью выраженности формы (сильно и слабо-выраженные), отсутствием или наличием трещин в почвенном покрове сводовой части, быстрым

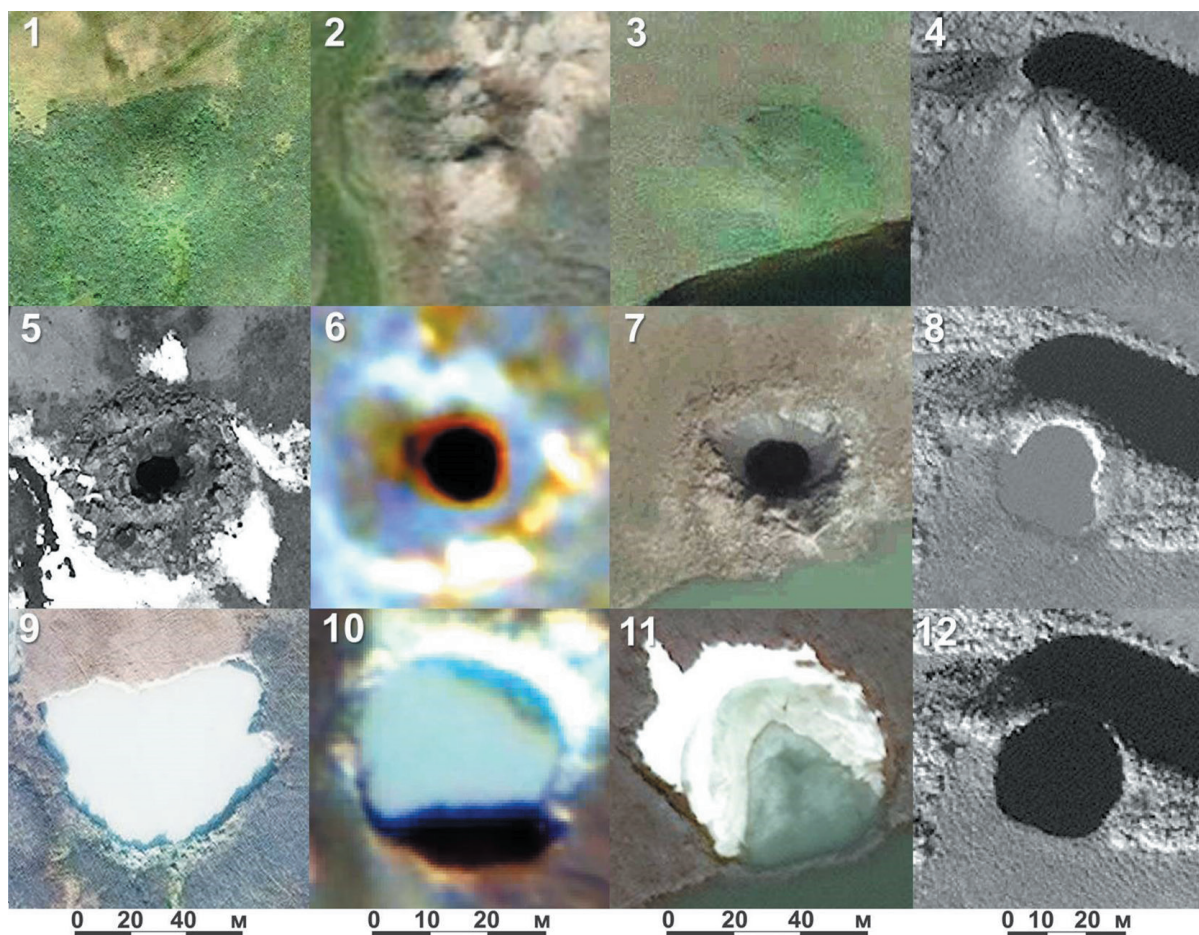


Рис. 2. Космоснимки бугров пучения (1–4), кратеров выбросов газа (5–8) и сформировавшихся кратерных термокарстовых озер (9–12) для четырех объектов исследований: С1 – Бованенковский (1 – GeoEye-1 30.07.10, 5 – WorldView-1 15.06.14, 9 – WorldView-2 02.10.16), С3 – Антипаютинский (2 – WorldView-2 05.09.11, 6 – WorldView-2 14.11.13, 10 – Ресурс-П 31.08.15), С4 – Дерябинский (3 – QuickBird 01.08.09, 7 – QuickBird 19.07.13, 11 – WorldView-2 21.06.18), С12 – Еркутинский (4 – WorldView-1 18.06.16, 8 – WorldView-1 25.07.18, 12 – WorldView-1 21.08.19)

Fig. 2. Satellite images of frost mounds (1–4), gas blowout craters (5–8) and formed thermokarst lakes (9–12) for four studied objects: C1 – Bovanenkovsky (1 – GeoEye-1 30.07.10, 5 – WorldView-1 15.06.14, 9 – WorldView-2 02.10.16), C3 – Antipayutinsky (2 – WorldView-2 05.09.11, 6 – WorldView-2 14.11.13, 10 – Resource-P 31.08.15), C4 – Deryabinsky (3 – QuickBird 01.08.09, 7 – QuickBird 19.07.13, 11 – WorldView-2 21.06.18), C12 – Yerkutinsky (4 – WorldView-1 18.06.16, 8 – WorldView-1 25.07.18, 12 – WorldView-1 21.08.19)

(один—три года) превращением в термокарстовые озера; форма кратерного озера может значительно отличаться от правильного круга. Закономерностью для всех исследованных взорвавшихся МБП является то, что кратер выброса газа формируется в массиве подземного льда, покрытого тонким почвенным слоем.

Описанная выше модель субквальных МБП [31] по своей сути близка сформулированной нами ранее модели газонасыщенных МБП на суше Арктики с тем различием, что на суше роль покрывки выполняют ММП, а не придонный слой с газогидратами. Кроме того, по нашей модели дано обоснование возможного существования внутри ледового массива МБП газонасыщенной термокарстовой полости, образовавшейся за счет миграции и циркуляции (субвертикальной и субгоризонтальной) прогретых глубинных флюидов.

Модель МБП с газонасыщенной полостью была впервые сформулирована в 2014 г. в нашей первой работе на основе обследований Бованенковского кратера выброса газа С1 (ранее В1) [3, с. 14 и 17]: «Наиболее вероятно, что залежь газа образовалась не в традиционном песчаном коллекторе, а в полости на месте постепенного вытаивания погребенного льда (пластового, жильного, ядра булгуньяха-гидролакколита-пинго и др.) с замещением ледового/водного пространства газом... Существование ММП привело к... накоплению огромных объемов газа в ВЧР, в том числе и в термокарстовых полостях. Давления накопившегося газа в ряде мест оказалось достаточно для разрушения покрывающей толщи ММП, при этом произошел выброс разрушенной части породы за счет действия пневматического или газозрывного механизмов с образованием брустверов». Эта модель нашла серьезные дополнительные

обоснования во многих наших последующих исследованиях, включая математическое моделирование таких объектов в 2015 г.: «непосредственно перед выбросом газа в ММП существовала заполненная им полость, а выброшенная на поверхность Земли мерзлая порода до выброса формировала только выпуклую покрывку полого объекта в виде верхнего слоя мерзлых осадков, толщина которых на объекте В1 составляет около 8 м» [5, с. 13]. Также отметим, что при образовании залежей газа в талых песчаных межмерзлотных резервуарах при наличии аномально высоких пластовых давлений (АВПД) возможно локальное поднятие (пучение) вышележащей толщи-покрывки (ММП) с формированием на поверхности МБП (в первую очередь в ослабленных зонах с таликами). При этом в пласте-резервуаре могут происходить газовые разрывы сплошности (целостности) пород с образованием заполненных газом полостей.

Таким образом, согласно нашей модели МБП способны сформироваться и взорваться за счет АВПД газа, а не только за счет криогенного процесса. Это подтверждается математическим моделированием [5], результатами исследований Сеяхинского кратера (С11) [8] и другими имеющимися у авторов материалами. С учетом частичного размывания поверхности МБП на месте кратера С11 речной водой за 3,5 года он вырос на высоту около 3 м, перегородил реку, изменил ее русло и взорвался. При этом зафиксирована небывало высокая скорость роста бугра около 80 см в год (в 3—5 раз больше, чем в работах [13; 37]), что представляется возможным только за счет стабильного воздействия АВПД.

В 2014—2016 гг. большинство исследователей кратера С1 предполагали, что до взрыва МБП С1 внутри бугра было полное заполнение открывшегося кратерного пространства льдом и мерзлыми породами: «Объем вынесенного материала (выброшенного из воронки и частично разрушенного бугра) составляет 11 200 м³. Это почти в 6 раз больше объема материала, отложившегося по периферии воронки (1940 м³). Большая часть выброшенного материала (9260 м³) представляла собой лед, который по результатам полевых наблюдений вскрывается в стенках цилиндрической части воронки» [18, с. 25]. Однако ошибочность данного объяснения подтверждается космоснимком 15 июня 2014 г. с частично сохранившимся снегом, но без каких-либо выброшенных глыб льда и мерзлого грунта кроме бруствера — «материала, отложившегося по периферии воронки» [18].

В 2017 г. существование заполненной газом полости в МБП С1 было признано в работе [27, с. 96—97]: «Метан, видимо, концентрировался и заполнял полость, которая фиксируется по наличию «грота»... внутри ледяного тела. <...> Метан находился в полости воронки до ее разрушения, об этом свидетельствуют его высокое содержание в воздухе внутри кратера воронки в июле 2014 г. и резкое уменьшение этого показателя в ноябре 2014 г.».

Отметим, что приведенный здесь аргумент о высоком содержании метана 16 июля свидетельствует не о наличии полости (метан в 1,8 раза легче воздуха и быстро улетучивается), а о продолжавшемся подтоке газа по каналам в дне или стенках кратера. Уже 25 августа подток газа по этим каналам был перекрыт давлением обвалившейся в кратер породы и водной толщи, что снизило содержание метана в воздухе [2; 4].

Изучение распространения бугров пучения на полуострове Ямал

Во время полетов на вертолете над полуостровом Ямал и над территорией Большеземельской тундры (Ненецкий автономный округ) летом 2014—2015 гг. мы нашли более 100 МБП, которые были положены в основу нового раздела создаваемой нами базы ГИС «АМО» [2—9; 21 и др.]. На рис. 1.1 и 1.2 приведены два крупных характерных булгуньяха, обнаруженные нами в 2015 г. вблизи Бованенковского НГКМ на широте 68—69°.

В 2014 г. мы начали дешифрирование доступных космоснимков для изучения распространения МБП на полуострове Ямал (площадь исследования — 118 тыс. км²), а в 2015 г. приступили к формированию единой базы пространственных данных и данных ДЗЗ на территорию полуострова Ямал в ГИС «АМО» на базе ПО ArcGIS. При этом в ГИС «АМО» были включены: топографические карты открытого доступа масштаба 1:50 000 и 1:100 000 ФГУП «Госгисцентр»; космические снимки открытого доступа Landsat-5 (1985, 1988—1990 гг.), Landsat-7 (2000—2003 гг.), Landsat-8 (2013—2015 гг., зимний период 2013—2014 гг.), Sentinel-2 (2016 г.), а также цифровые модели рельефа (ЦМР) TopoDEM (разрешение 30 м), AsterGDEM (30 м), AW3D (AlosDEM, 25 м), ArcticDEM (5 м) и TanDEM (90 м). Кроме того, были получены и систематизированы по маршрутам тайлы (фрагменты) мозаик высокого разрешения (0,6—0,8 м), представленные на открытых картографических веб-ресурсах Here, Bing, Google. Дополнительно были использованы архивные данные Corona за 1968 и 1972 гг. (разрешение 1,8 и 3,5 м соответственно), которые были привязаны и сшиты в единые мозаики.

Для дистанционного выявления МБП использовались: топографическая основа масштаба 1:50 000, доступная на большую часть полуострова, с дополнением в южной части основой 1:100 000 (рис. 3.1); мозаика зимних снимков Landsat-8, состоящая из 10 исходных сцен с разрешением 15 м (рис. 3.2); мозаики высокого разрешения; ЦМР TopoDEM (рис. 3.3) и ArcticDEM (рис. 3.4) как модель, имеющая максимальную детальность.

На первом этапе был создан слой бугров на основе топографических карт (см. рис. 3.1), включающий 1967 объектов. Далее на основе зимней мозаики Landsat-8 было проведено уточнение пространственного положения обнаруженных объектов (МБП), а также сплошное дешифрирование

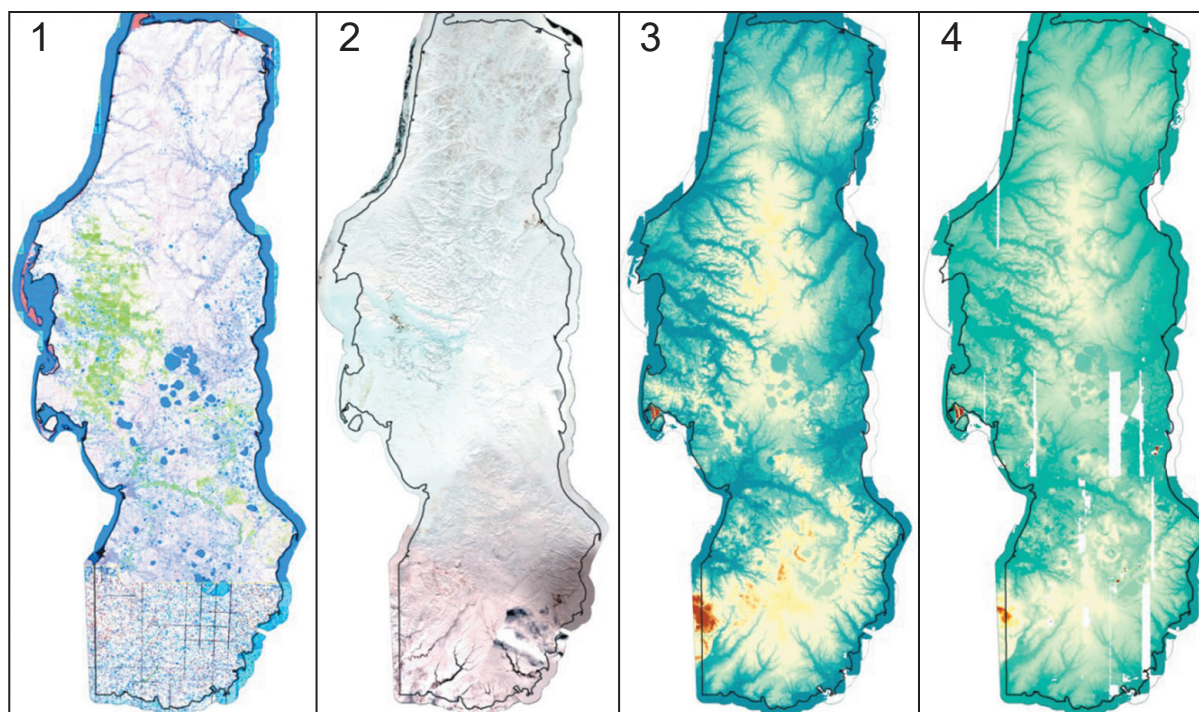


Рис. 3. Базовые данные для выявления многолетних бугров пучения: топографические карты (1) и данные ДЗЗ – мозаика зимних снимков Landsat-8 (2), мозаики ЦМР TopoDEM (3) и ArcticDEM (4)
 Fig. 3. Initial data for identification of perennial frost mounds: Topographic maps (1) and remote sensing data – mosaic of winter images Landsat-8 (2), DEM mosaics from TopoDEM (3) and ArcticDEM (4)

всей территории полуострова Ямал, что позволило существенно дополнить слой. Основной методический прием заключается в использовании зимних снимков территории, на которых за счет низкого положения Солнца и отсутствия растительности создается визуальный аналог теневой отмывки (псевдообъемного изображения) рельефа (рис. 4). Далее на основе мозаик высокого разрешения и ЦМР ArcticDEM было проведено уточнение проведенного дешифрирования, позволившее выделить пропущенные объекты и удалить сомнительные. В итоге работы по состоянию на 1 июля 2019 г. (рис. 5.1) общее количество выявленных МБП в ГИС «АМО» достигло 7185 (средняя плотность 1 МБП на 16,4 км²), что более чем в 10 раз превышает результат, опубликованный в [33].

Кроме выделения потенциальных МБП была предпринята попытка их классификации в зависимости от различий геоморфологической обстановки (в хасырях, на низкой морской террасе, холмообразные останцы речных и озерных террас и др.). В итоге установлено, что к классическим МБП — булгуньяхам, расположенным в центре котловины спущенного озера и на низких геоморфологических уровнях (долина реки, первая или вторая морская или речная террасы), относится около 44,8% МБП (рис. 5.1). На водоразделах, а также в верховьях рек и ручьев обнаружено около 12,9% МБП (рис. 5.2). К отмеченным

выше категориям (суммарно 57,7%) относятся известные взорвавшиеся МБП (С1, С2, С9, С11 и С12).

На рис. 5.2 для комплексного анализа приведена также схема распространения 415 термокарстовых озер с кратерами выбросов газа (ТОКВГ) на дне (данные ГИС «АМО»), впервые опубликованная в 2019 г. [9]. Данная схема дополнена обнаруженными за последний год 42 ТОКВГ и 5 кратерными озерами, образовавшимися на месте взорвавшихся МБП (С1, С2, С9, С11 и С12).

Для статистического прогноза наиболее опасных зон с точки зрения возможных выбросов газа по сформированному в ГИС «АМО» базам данных на первом этапе в ПО ArcGIS (ESRI) были рассчитаны две картографические схемы плотностей распространения МБП и ТОКВГ на всей территории полуострова Ямал. Пробные расчеты с помощью инструмента Spatial Join по сетке с шагом расчета 10×10 км (100 км²) давали слишком большое осреднение, а при шаге 2×2 км и менее картина становилась перенасыщенной (чрезмерно пятнистой) для прослеживания региональных закономерностей. Поэтому итоговые расчеты были выполнены для двух массивов точек по сетке 5×5 км (25 км²). При этом расчетные значения количества МБП/ТОКВГ в каждой ячейке были присвоены точке в ее середине. После этого с помощью инструмента интерполяции (Interpolation) для двух массивов были рассчитаны непрерывные поверхности (гриды) с плотностью объектов в пересчете на 25 км². К каж-

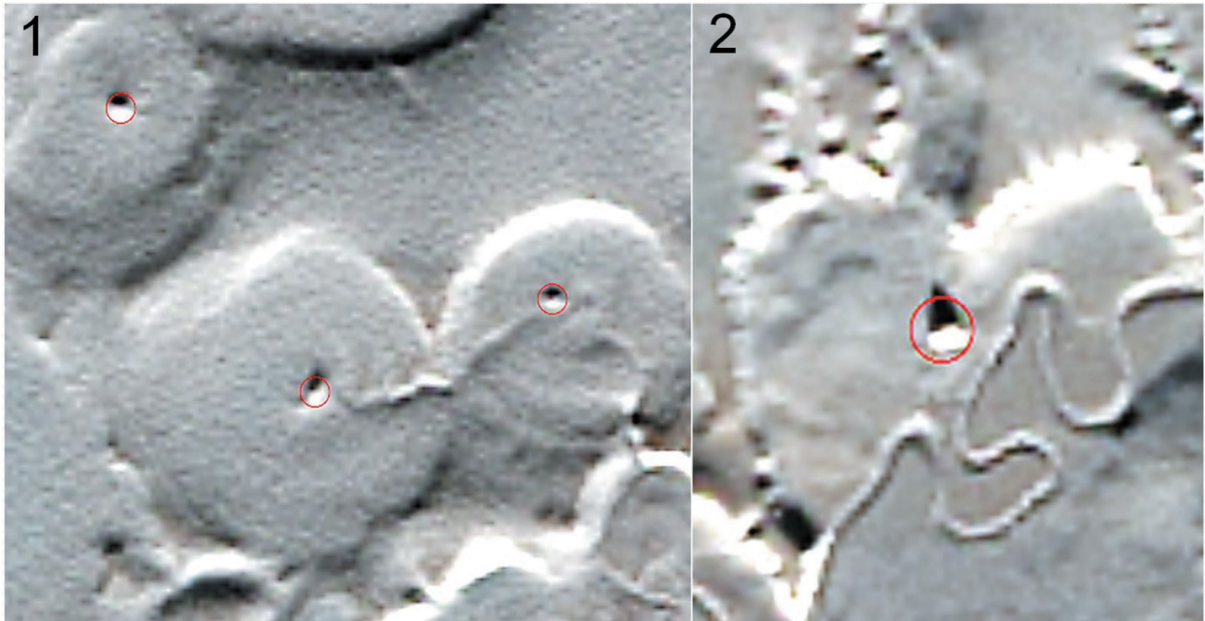
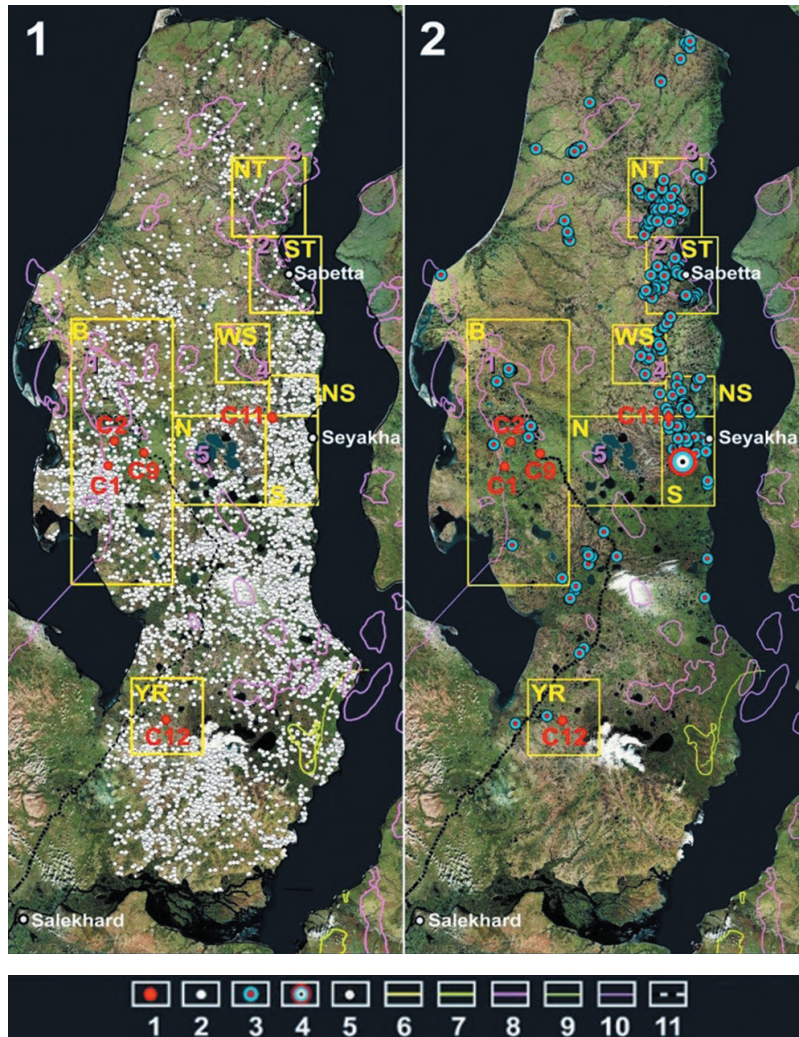


Рис. 4. Примеры выделения бугров пучения на зимних космоснимках полуострова Ямал
Fig. 4. Examples of frost mounds detection on winter satellite images of the Yamal Peninsula

Рис. 5. Схемы распространения кратеров выбросов газа на суше полуострова Ямал, бугров пучения (1) и озер с кратерами на дне (2). Обозначения: 1 – кратеры выбросов газа C1, C2, C9, C11 и C12; 2 – бугры пучения; 3 – озера с кратерами на дне; 4 – озеро Открытие; 5 – населенные пункты; 6 – участки детальных исследований Института проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН (B – Бованенковский, ST – Южно-Тамбейский, NT – Северо-Тамбейский, N – Нейтинский, S – Сеяхинский, NS – Северо-Сеяхинский, WS – Западно-Сеяхинский, YR – Еркутинский); 7 и 8 – месторождения нефти (7) и газа (8), включая показанные розовым цветом Бованенковское (1), Южно-Тамбейское (2), Северо-Тамбейское (3), Западно-Сеяхинское (4) и Нейтинское (5); 9 – нефтепровод; 10 – газопровод Бованенково – Ухта; 11 – железная дорога. Картографическая основа – ESRI

Fig. 5. Distribution patterns of gas blowout craters, frost mounds (1) and lakes with craters at the bottom (2) on the Yamal Peninsula land. Legend: 1 – gas blowout craters C1, C2, C9, C11 and C12; 2 – frost mounds; 3 – lakes with craters on the bottom; 4 – Lake Otkrytiye; 5 – settlements; 6 – areas of detailed studies of the OGRI RAS (B – Bovanenkovsky, ST – South Tambey, NT – North Tambey, N – Neytinsky, S – Seyakhinsky, NS – North Seyakhinsky, WS – West Seyakhinsky, YR – Yerkutinsky); 7 and 8 – oil (7) and gas (8) fields, including Bovanenkovskoye (1), South Tambeyskoye (2), North Tambeyskoye (3), West-Seyakhinskoye (4), and Neytinskoye (5), shown in pink; 9 – oil pipeline, 10 – gas pipeline Bovanenkovskoye-Ukhta; 11 – railway. Base map – ESRI



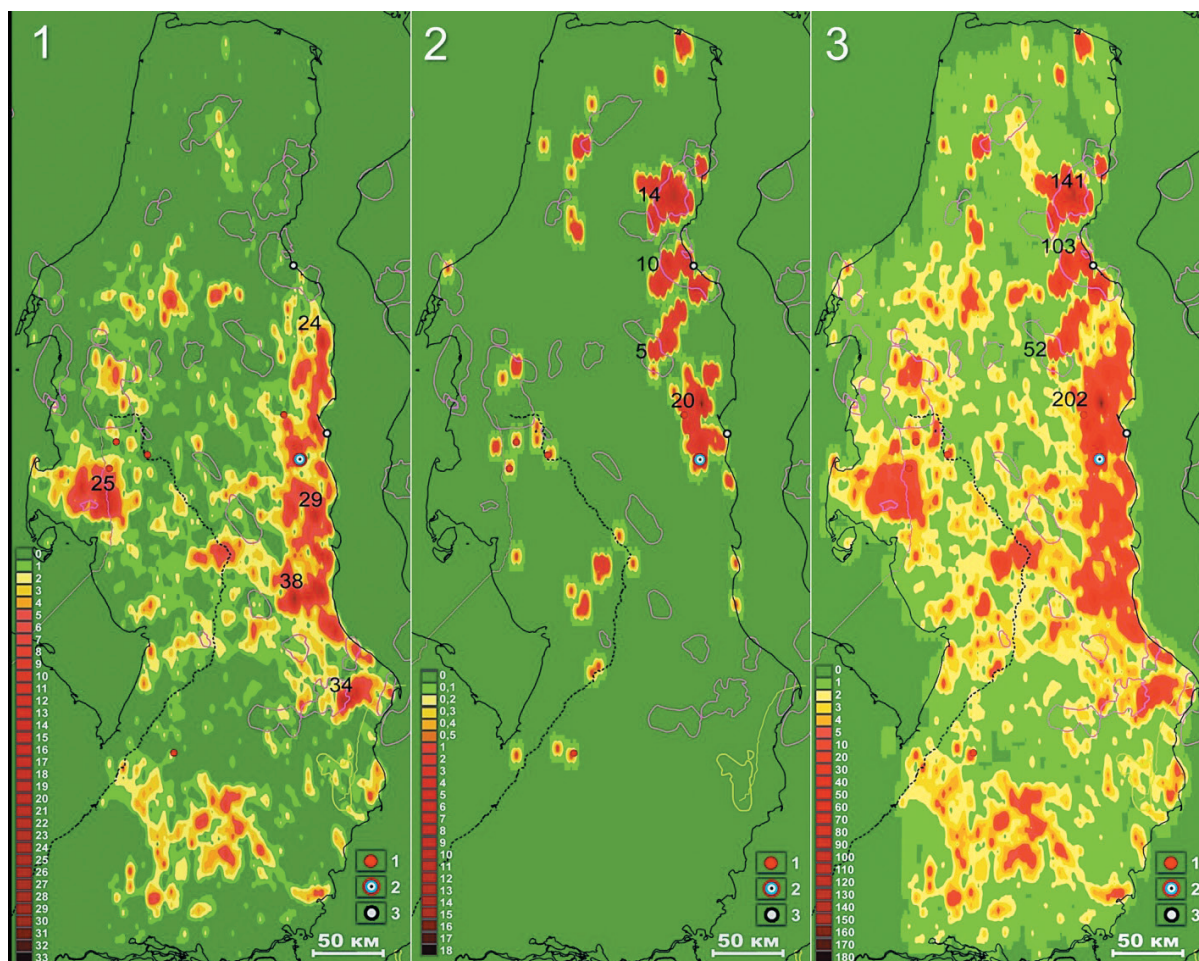


Рис. 6. Схемы плотности распространения бугров пучения (1), озер с кратерами выбросов газа на дне (2) и условного риска возникновения выбросов газа (3) в расчете на 25 км² (версия 1). Обозначения: 1 – кратеры выбросов газа, 2 – озеро Открытие, 3 – населенные пункты

Fig. 6. Density distribution patterns of frost mounds (1), lakes with craters at the bottom (2) and scheme of relative risk of gas blowouts (3) per 25 km² (version 1). Legend: 1 – gas blowout craters, 2 – Lake Otkrytiye, 3 – settlements

дому из гридов была применена цветовая кодировка по расчетному количеству МБП и ТОКВГ, в результате чего были получены схемы плотности их распространения, приведенные на рис. 6.1. и 6.2.

В нашей работе [9] мы отмечали, что большинство ТОКВГ (63,6%) приурочено к крупным месторождениям, при этом наблюдается связь их распространения с региональным тектоническим строением и ориентацией глубинных разломов. В качестве примера приводился Сеяхинский участок с 32 ТОКВГ (S на рис. 5.2). На рис. 7 приведен пример Северо-Тамбейского участка (NT на рис. 5.2), рекордно по количеству выявленных ТОКВГ (132), из которого видно, что около 92,4% этих озер лежат в трех пересекающихся полосах, ориентированных в направлениях ЮВ-СЗ, ЮЗ-СВ и близко к Ю-С. При этом наибольшее количество ТОКВГ (70,5%) расположено в сводовой части уникального по запасам газа Северо-Тамбейского месторождения (площадь около 850 км², запасы более 1 трлн м³). Также видна приуроченность ТОКВГ к речной системе, как и на Сеяхинском участке [9].

Анализ плотностей распространения МБП в расчете на 25 км² показал, что экстремальные значения (от 24 до 38) приурочены к следующим зонам: Средне-Ямальской (38), Ростовцевской (34), Южно-Сеяхинской (29), Байдарацкой (25), Северо-Сеяхинской (24). Экстремальные значения плотностей ТОКВГ (от 5 до 20): Сеяхинская (20), Северо-Тамбейская (14), Южно-Тамбейская (10), Западно-Сеяхинская (5).

На следующем этапе, при совместном анализе схем плотностей распространения МБП и ТОКВГ, была предпринята первая попытка создания единой схемы условного риска (УРВГ) выброса/взрыва газа. Условность заключается в том, что на данном этапе невозможно однозначно оценить реальный риск взрыва конкретных МБП. При этом очевидно, что большая часть МБП не представляет угроз. В то же время на дне обнаруженных ТОКВГ однозначно происходили выбросы/взрывы газа в количестве от одного до нескольких сотен и даже тысяч раз [7; 8, с. 91; 9, с. 32]. При этом доказано, что в ряде случаев из одного кратера происходили многократные

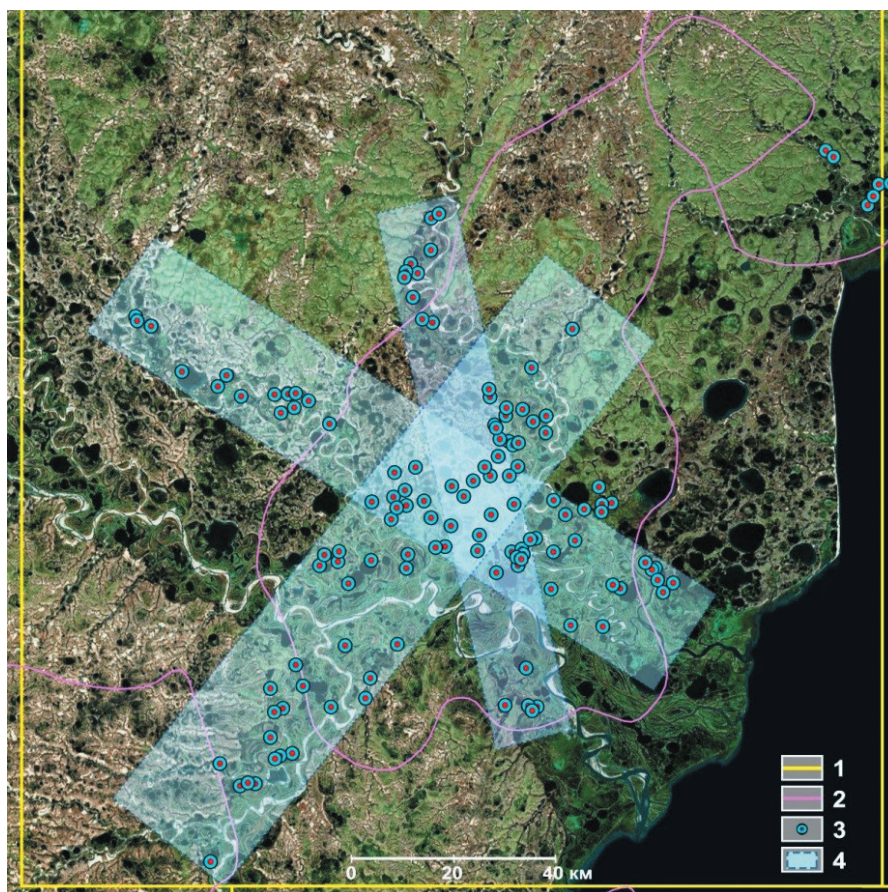


Рис. 7. Расположение озер с признаками дегазации на Северо-Тамбейском (NT) участке. Обозначения: 1 – границы участка, 2 – контуры месторождений, 3 – выявленные озера, 4 – основные зоны распространения. Картографическая основа – ESRI
Fig. 7. The location of the lakes with sings of degassing in the North Tambeyskoye (NT) area. Legend: 1 – area borders, 2 – boundaries of fields, 3 – detected lakes, 4 – main distribution zones. Base map – ESRI

выбросы газа [6—9]. Поэтому на данном этапе исследований было принято считать угрозы выбросов газа на ТОКВГ с весом в 10 раз выше, чем на МБП. Расчетная схема условного риска возникновения опасных и катастрофических выбросов газа (версия 1) приведена на рис. 6.3. Экстремальными показателями по УРВГ приняты значения от 50 до 202, при этом выделяются четыре участка: Сеяхинский (202), Северо-Тамбейский (141), Южно-Тамбейский (103) и Западно-Сеяхинский (52).

Обобщенный анализ позволяет сделать следующие выводы об основных опасных зонах. Эпицентр первой по риску Сеяхинской зоны (УРВГ — 202), характеризующейся самым большим количеством ТОКВГ (20), находится в 28 км от поселка Сеяха. Отметим, что именно в этой зоне находятся основные объекты наших исследований 2017—2019 гг.: Сеяхинский кратер газового выброса С11 [8] — в 14 км от эпицентра, а озеро Открытие [9] в 40 км к югу от эпицентра. Вторым по риску (УРВГ — 141) является Северо-Тамбейская зона (14 ТОКВГ), приуроченная к одноименному месторождению. Эпицентр третьей зоны (УРВГ — 103) находится на западной границе Южно-Тамбейского месторождения в 17 км от поселка Сабетта (10 ТОКВГ). Четвертая зона (УРВГ —

52) находится в районе Западно-Сеяхинского месторождения (5 ТОКВГ). Таким образом, на данном этапе изученности установлено, что практически все экстремальные зоны приурочены к месторождениям в восточной части полуострова Ямал.

В результате анализа УРВГ в районах действующих промыслов и их инфраструктуры получено их следующее распределение: Южно-Тамбейский (103), Бованенковский (34), Мыс Каменный (11), Новопортовский (5).

Предполагается продолжить исследования распространения ТОКВГ по поступающим новым данным ДЗЗ. Кроме того, при подготовке новой версии схемы УРВГ планируется учесть дополнительные озера, в которых эмиссия газа подтверждена по другим критериям (например, неоднородности и пробоины во льду, замутненность воды и др.) [6—9; 11].

В завершение отметим, что летом 2019 г. в Арктике в восточной части полуострова Ямал, характеризующейся наиболее высоким условным риском выброса газа (район Сеяхи-Сабетты, широты 70—71,3°), на ряде объектов суши и озер была проведена уникальная по комплексу технического оснащения экспедиция по изучению криосферы и дегазации Земли. Широкий комплекс геолого-геофизических работ

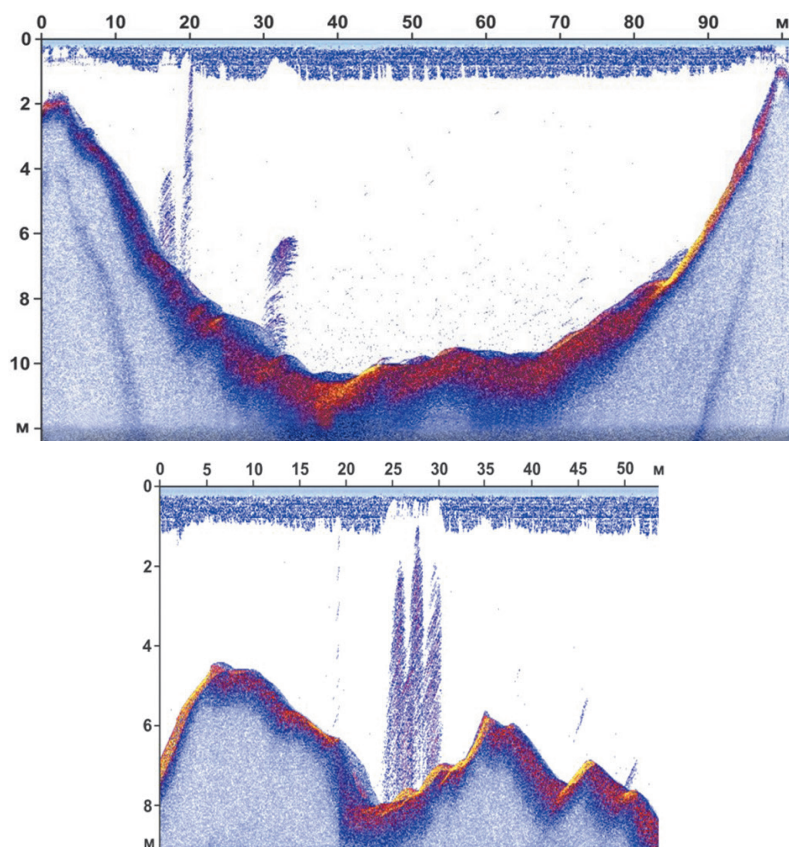


Рис. 8. Фрагменты двух эхолокационных профилей с газовыми факелами на затопленном речной водой Сеяхинском кратере С11
 Fig. 8. Fragments of two ultrasonic profiles with gas flares on Seyakha crater (C11) flooded by the river water

включал: эхолокацию, георадиолокацию, активную минисейсморазведку МОГТ 2D-3D, пассивную 3D микросейсмику, гидротермометрию, бурение неглубоких скважин и аэросъемку (вертолет и БПЛА). Экспедиция была организована и проведена ИПНГ РАН в сотрудничестве с рядом других институтов и организаций при поддержке РФФИ и ПАО «НОВАТЭК» — «Ямал СПГ». Собраны уникальные материалы (включая пробы выходящего газа), которые будут обработаны и проанализированы в 2019—2020 гг. Предварительные данные подтверждают вулканический генезис длительных выходов газа (факелы газа) из Сеяхинского кратера С11 (рис. 8) [8], а также повторных мощных выбросов газа из кратеров озера Открытие (рис. 9) [9]. На дне озера Открытие с помощью эхолокации и георадиолокации обнаружены невидимые из космоса несколько кратеров и оползни извергнутой из жерл кратеров породы. Также подтверждается высокий уровень эмиссии газа в восточной части полуострова Ямал.

Вулканическая терминология

Согласно всемирно известному географическому словарю издательства «Elsevier» (авторы В. М. Котляков и А. И. Комарова [37, с. 478]) под грязевым вулканом (*Mud volcano*) понимается «геологическое образование, постоянно или периодически извергающее на поверхность земли грязевые массы и газы, часто с водой и нефтью». По ГОСТ Р 57123-2016 также четко определен основной признак грязевого вулкана — «геологическое образование, постоянно или периодически извергающее грязевые массы и газы», при этом отмечается широко из-

вестная приуроченность грязевых вулканов к разломам. Этим признакам соответствуют изучаемые нами явления на ряде объектов полуостровов Ямал и Гыданский [6—9]. При этом выбросам газа со дна озер с таликами (озеро Открытие [9] и др.) сопутствуют извержения разжиженных водой терригенных пород (грязи), что позволяет отнести их к грязевым вулканам. Наличие ММП вносит свою специфику — газ выбрасывает куски льда, ледогрунта и мерзлой породы. В связи с этим для данного феномена представляется возможным применение термина «криовулканы», который пока не описан в ГОСТах. Мы предлагаем зафиксировать следующую формулировку определения термина «криовулкан» — «геологическое образование, постоянно или периодически извергающее газ, куски мерзлой породы, ледогрунта и (или) льда».

Дополнительно отметим, что слово «вулкан» происходит от латинского *vulkanus* — огонь, пламя. На всех объектах мощных выбросов газа, где были очевидцы (С3, С11 и С12), происходили самовоспламенения и взрывы газа, что характерно для сильных извержений грязевых вулканов [2—4; 6—9].

Заключение

1. Впервые в Арктике проведена работа по сплошному дистанционному картированию многолетних бугров пучения (МБП) с верификацией большинства объектов по данным ДЗЗ среднего и высокого разрешения, а также ЦМР. При этом только на полуострове Ямал зафиксировано 7185 МБП, что на 18,6% больше, чем было ранее известно (6059) во всей азиатской части территории России, и в 4,4 раза больше, чем было известно на всем севере Западной Сибири [33].

2. Разработана и апробирована технология выявления бугров пучения на основе комплексного дешифрирования мозаик зимних данных ДЗЗ и ЦМР высокого разрешения. Успешность примене-

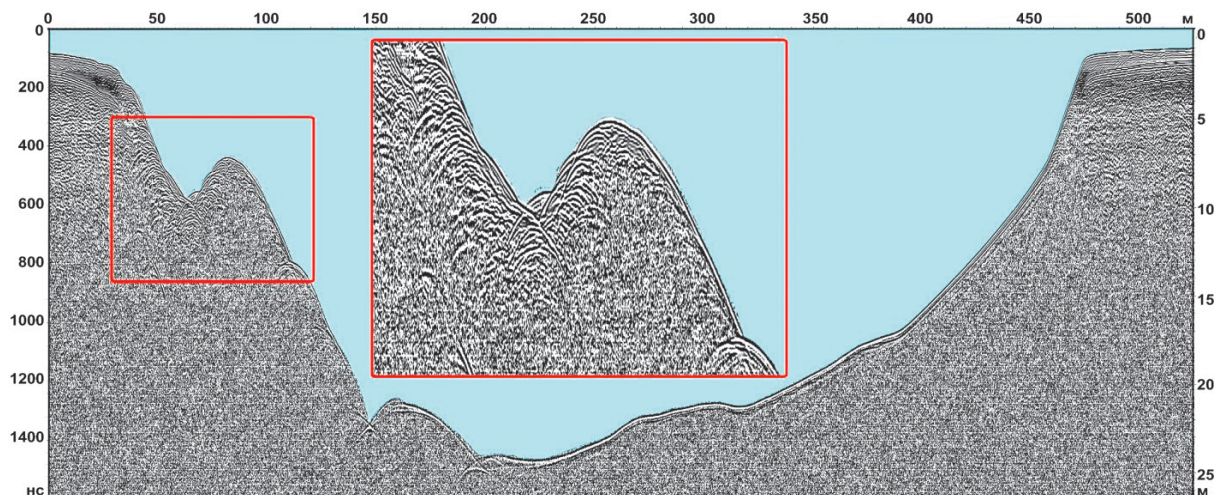


Рис. 9. Субширотный георадиолокационный профиль через озеро Открытие с увеличенным фрагментом кратера выброса газа в апреле 2019 г.

Fig. 9. Sub-latitude GPR profile across Lake Otkrytiye with an enlarged fragment of the gas blowout crater, formed in April 2019

ния разработанной технологии позволяет экстраполировать ее на все арктические и субарктические регионы. При расширении регионов исследования предполагается автоматизировать трудоемкие процессы дешифрирования космоснимков за счет разработки и применения специализированного программного обеспечения с элементами искусственного интеллекта. Такая работа проводится в сотрудничестве ИПНГ РАН с Муромским институтом ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет».

3. В ходе дешифрирования данных ДЗЗ количество обнаруженных ТОКВГ достигло 415. Выявление кратеров на дне термокарстовых озер по данным аэрокосмических наблюдений является надежным прямым методом поиска зон активной дегазации недр. Сложности данных исследований обусловлены дефицитом кондиционных оптических данных ДЗЗ высокого разрешения, связанным с ограниченным объемом съемки в короткий безледовый период, часто значительной глубиной озер и низким уровнем прозрачности воды, а также сложными погодными условиями (облачность, туманы, сильный ветер и др.).

4. Впервые созданы картографические схемы плотности распространения опасных объектов, угрожающих выбросами газа, и комплексная схема условного риска выбросов газа для всей территории полуострова Ямал. На данном этапе изученности (первичная оценка) установлено, что экстремально опасные зоны находятся на Сеяхинском, Северо-Тамбейском и Южно-Тамбейском участках исследований.

5. В ряде ТОКВГ доказана непрерывная и/или периодическая эмиссия газа, включая мощные извержения (выбросы) газа, формирующие крупные подводные кратеры с брустверами выброшенной породы. Это свидетельствует о вулканическом генезисе извержений, которые в зависимости от состояния

приповерхностных отложений (талое или мерзлое) можно отнести к грязевулканическим или криовулканическим. В последнем случае газ выбрасывает из ММП не разжиженную водой глину (грязь), а куски льда, ледогрунта и мерзлой породы.

6. Подводные бугры пучения (пинго и грязевые вулканы) на акваториях морей Арктики способны изменять рельеф дна и угрожают мощными выбросами газа с формированием нового рельефа за счет выброшенной газом породы. Они представляют большую опасность при освоении морских месторождений, включая бурение/эксплуатацию скважин и функционирование подводных и надводных технических средств, а также для судоходства по Северному морскому пути и другим направлениям. Необходимо создать и реализовать специальную программу мониторинга подводной обстановки на шельфе в районах освоения ресурсов углеводородов и судоходства.

7. Обоснована необходимость расширения регионов исследований с детализацией в районах жизнедеятельности человека и мониторинга процессов динамики криолитосферы и дегазации в районах активного недропользования с широким распространением опасных объектов.

Работа выполнена по государственному заданию по теме «Рациональное природопользование и эффективное освоение нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли» (№ АААА-А19-119021590079-6) с применением технологических разработок, созданных по программе Президиума РАН № 1.55.

Авторы признательны: ПАО «НОВАТЭК», ОАО «Ямал СПГ» и лично Е. А. Коту за большую неоднократную помощь в логистической поддержке экспедиционных работ; ООО «НПЦ Геотех» за техническую помощь в проведении полевых работ в 2018—2019 гг.

Литература/References

1. Арабский А. К., Арно О. Б., Богдавленский В. И. и др. Геоэколого-техногенные аспекты и их роль при освоении газовых месторождений в районе Ямбурга // Труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология-2018». Актуальные проблемы нефти и газа. — 2018. — Вып. 4 (23). — 10 с. — URL: http://oilgasjournal.ru/issue_23/arabskiy.html. — DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art73.

Arabskiy A. K., Arno O. B., Bogoyavlenskiy V. I., Zaytsev A. N., Kirsanov S. A. Geocologo-tehnogennyye aspekty i ikh rol' pri osvoenii gazovykh mestorozhdeniy v rayone Yamburga. [Geo-ecological and technogenic aspects and their role in Yamburg Region gas fields development]. Aktualnye problemy nefti i gaza, 2018, iss. 4 (23), 10 p. Available at: http://oilgasjournal.ru/issue_23/arabskiy.html. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art73. (In Russian).

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

Bogoyavlenskiy 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]. Tr. Volnogo ekon. o-va, 2014, vol. 182, no. 3, pp. 12—175. (In Russian).

3. Богдавленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала // Бурение и нефть. — 2014. — № 9. — С. 13—18.

Bogoyavlenskiy V. I. Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. Voronki Yamala. [The threat of catastrophic gas blowouts form the Arctic cryolithozone. Yamal craters]. Burenie i neft', 2014, no. 9, pp. 13—18. (In Russian).

4. Богдавленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала. — Ч. 2 // Бурение и нефть. — 2014. — № 10. — С. 4—8.

Bogoyavlenskiy V. I. Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. Voronki Yamala. Pt. 2. [The threat of catastrophic gas blowouts form the Arctic cryolithozone. Yamal and Taymyr craters. Pt. 2]. Burenie i neft', 2014, no. 10, pp. 4—8. (In Russian).

5. Богдавленский В. И., Гараш И. А. Математическое моделирование процесса образования кратеров газового выброса в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 3. — С. 12—17.

Bogoyavlenskiy V. I., Garagash I. A. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa obrazovaniya kraterov gazovogo vybrosov v Arktike. [Mathematic modelling of gas craters formation process in the Arctic]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2015, no. 3 (23), pp. 12—17. (In Russian).

6. Богдавленский В. И. Газогидродинамика в кратерах выброса газа в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 1 (29). — С. 48—55. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55.

Bogoyavlenskiy V. I. Gazogidrodinamika v kraterakh vybrosov gaza v Arktike. [Gas-hydrodynamics in the Arctic craters of gas blowout]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2018, no. 1 (29), pp. 48—55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55. (In Russian).

7. Богдавленский В. И., Богдавленский 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.

Bogoyavlenskiy V. I., Bogoyavlenskiy I. V. Prirodnyye i tekhnogennyye 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. Богдавленский 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: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47.

Bogoyavlenskiy V. I., Sizov O. S., Mazharov A. V., Bogoyavlenskiy I. V., Nikonov R. A., Kargina T. N., Kishankov A. V. Degazatsiya Zemli v Arktike: distantsionnyye i ekspeditsionnyye issledovaniya katastroficheskogo Seyakhinskogo vybrosov 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: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47. (In Russian).

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

Bogoyavlenskiy V. I., Bogoyavlenskiy I. V., Kargina T. N., Nikonov R. A., Sizov O. S. Degazatsiya Zemli v Arktike distantsionnyye i ekspeditsionnyye issledovaniya vybrosov gaza na termokarstovykh ozerakh. [Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of gas blowouts on thermokarst lakes]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2019, no. 2 (34), pp. 31—47. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47. (In Russian).

10. Баду Ю. Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи. — М.: Науч. мир, 2018. — 232 с.

Badu Y. B. Kriogennaya tolscha gazonosnykh struktur Yamala. O vliyanii gazovykh zalezhey na formirovaniye i razvitiye kriogennoy tolschi. [Cryogenic stratum of gas-bearing structures of Yamal. On the influence of gas deposits on the formation and development of a cryogenic stratum]. Moscow, Nauch. mir, 2018, 232 p. (In Russian).

11. Бондарев В. Н., Локтев А. С., Длугач А. Г., Потанин Ю. В. Субаквальная мерзлота на шельфе арктики

- тических морей и методы ее исследования // ООО «Газфлот» — 10 лет на арктическом шельфе. — М.: ФГУП «Нефть и газ», 2004. — С. 109—114.
- Bondarev V. N., Loktev A. S., Dlugach A. G., Potapkin Yu. V. Subakvalnaya merzlota na shelfe arkticheskikh morey i metody eyo issledovaniya. [Underwater permafrost on the Arctic seas shelf and methods of its investigation]. ООО «Gazflot» — 10 let na arkticheskom shelfe. Moscow, FGUP «Neft i gaz», 2004, pp. 109—114 (In Russian).
12. Бондур В. Г., Кузнецова Т. В. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. — 2015. — № 4. — С. 30—43. — DOI: 10.7868/SO20596141504003X.
- 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]. Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2015, no. 4, pp. 30—43. DOI: 10.7868/SO20596141504003X. (In Russian).
13. Васильчук Ю. К., Васильчук А. К., Буданцева Н. А., Чижова Ю. Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов / Под ред. Ю. К. Васильчука. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. — 571 с.
- Vasilchuk Yu. K., Vasilchuk A. K., Budantseva N. A., Chizhova Yu. N. Vypuklye bugry pucheniya mnogoletne-myorzlykh torfyanykh massivov. [Bulging frost mounds of permafrost peat massifs]. Pod red. Yu. K. Vasilchuka. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 2008, 571 p. (In Russian).
14. Васильчук Ю. К., Буданцева Н. А., Васильчук А. К. и др. Изотопный состав ледяного ядра позднеголоценового булгуньяха на месторождении Песцовое в долине реки Евояха на юге Тазовского полуострова // Криосфера Земли. — 2014. — Т. 18, № 4. — С. 47—58.
- Vasilchuk Yu. K., Budantseva N. A., Vasilchuk A. K. et al. Izotopnyy sostav ledyanogo yadra pozdnegolotsenovo-goltsenovo bulgunnyakha na mestorozhdenii Pestsovoye v doline reki Evoyakha Tazovskogo poluoostrova. [Isotope composition of the Late Holocene pingo ice core on the Pestsovoye Field in the Evoyakha River valley in the south of the Taz Peninsula]. Kriosfera Zemli, 2014, vol. 18, no. 4, pp. 47—58. (In Russian).
15. Васильчук Ю. К., Буданцева Н. А., Васильчук А. К. и др. Миграционные бугры пучения в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока // Инженер. геология криолитозоны. — 2014. — № 1. — С. 40—64.
- Vasilchuk Yu. K., Budantseva N. A., Vasilchuk A. K. et al. Migratsionnyye bugry pucheniya v kriolitozone Vostochnoy Sibiri i Dalnego Vostoka. [Migrating mounds in the Eastern Siberia and Far East cryolithozone]. Inzhener. Geologiya, 2014, no. 1, pp. 40—64. (In Russian).
16. Власов А. Н., Хименков А. Н., Волков-Богородский Д. Б., Левин Ю. К. Природные взрывные процессы в криолитозоне // Наука и технол. разработки. — 2017. — Т. 96, № 3. — С. 41—56.
- Vlasov A. N., Khimenkov A. N., Volkov-Bogorodskiy D. B., Levin Yu. K. Prirodnyye vzryvnyye protsessy v kriolitozone. [Natural explosive processes in cryolithozone]. Nauka i tekhnol. razrabotki, 2017, vol. 96, no. 3, pp. 41—56. (In Russian).
17. Геворкян С. Г., Корейша М. М. Взрывы бугров пучения // Материалы гляциол. исслед. — 1992. — Вып. 77. — С. 120—129.
- Gevorkyan S. G., Koreysha M. M. Vzryvy bugrov pucheniya. [Frost mounds explosions]. Materialy glyatsiol. issled., 1992, vol. 77, pp. 120—129. (In Russian).
18. Кузяков А. И., Союшкин А. В., Лейбман М. О. и др. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на Центральном Ямале // Криосфера Земли. — 2015. — Т. 19, № 2. — С. 15—25.
- Kizyakov A. I., Sonyushkin A. V., Leibman M. O. et al. Geomorfologicheskiye usloviya obrazovaniya voronki gazovogo vybrosa i dinamika etoy formy na Tsentral'nom Yamale. [Geomorphological conditions of formation of gas blowout crater and dynamics of this form in Central Yamal]. Kriosfera Zemli, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 15—25. (In Russian).
19. Кругликов Н. М., Кузин И. Л. Выходы глубинного газа на Уренгойском месторождении // Структурная геоморфология и неотектоника Западной Сибири в связи с нефтегазоносностью. — Тюмень, 1973. — С. 96—106. — (Тр. ЗапСибНИГНИ; вып. 3).
- Kruglikov N. M., Kuzin I. L. Vykhody glubinnogo gaza na Urengoyском месторождении. [Emissions of deep gas on the Urengoy field]. Strukturnaya geomorfologiya i neotektonika Zapadnoy Sibiri v svyazi s neftegazonostyu. 1973, pp. 96—106. (Tr. ZapSibNIGNI, iss. 37). (In Russian).
20. Кузин И. Л. О природе аномальных озер — показателей углеводородов в глубоких горизонтах осадочного чехла // Проблемы оценки новых зон нефтегазонакопления в основных продуктивных толщах Западной Сибири. — СПб.: ВНИГРИ, 1992. — С. 129—137.
- Kuzin I. L. O prirode anomal'nykh ozer — pokazateley uglevodorodov v glubokikh gorizontakh osadochnogo chekhla. [About the nature of blue lakes — the indicators of hydrocarbon accumulations in deep horizons of sedimentary cover]. Problemy otsenki novykh zon neftegazonakopleniya v osnovnykh produktivnykh tolschakh Zapadnoy Sibiri. St. Petersburg, VNIGRI, 1992, pp. 129—137. (In Russian).
21. 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.
- Laverov N. P., Bogoyavlenskiy V. I., Bogoyavlenskiy I. V. Fundamentalnyye aspekty ratsionalnogo osvoyeniya resursov nefti i gaza Arktiki i shelfa Rossii: strategiya, perspektivy i problem. [Fundamental aspects of rational Russian Arctic and shelf oil and gas resources development: strategy, perspectives and challenges]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2016, no. 2 (22), pp. 4—13. (In Russian).

22. Мельников В. П., Спесивцев В. И., Куликов В. Н. О струйной дегазации углеводородов как источнике новообразований льда на шельфе Печорского моря // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике: Материалы Международной конференции. — Новосибирск: Наука, 1997. — С. 259—269.
- Mel'nikov V. P., Spesivtsev V. I., Kulikov V. N.* O struynoy degazatsii uglevodorodov kak istochnike novoobrazovaniy l'da na shel'fe Pechorskogo morya. [On jet degassing of hydrocarbons as a source of ice formation on the shelf of the Pechora Sea]. *Itogi fundamental'nykh issledovaniy kriosfery Zemli v Arktike i Subarktkike. Materialy mezhdunarodnoy konferentsii.* Novosibirsk, Nauka, 1997, pp. 259—269. (In Russian).
23. Нежданов А. А., Новопашин В. Ф., Огибенин В. В. и др. Грязевой вулканизм на севере Западной Сибири // Сборник научных трудов ООО «ТюменьНИИгипрогаз»: Геология и геологоразведка 2011 г. / ООО «ТюменьНИИгипрогаз». — Тюмень: Флат, 2011. — С. 73—79.
- Nezhdanov A. A., Novopashin V. F., Ogibenin V. V. et al.* Gryazevoy vulkanizm na severe Zapadnoy Sibiri [Mud volcanism in the north of Western Siberia]. "TyumemNIIgiprogaz" Ltd paper collection: *Geologiya i geologorazvedka 2011. TyumemNIIgiprogaz* Ltd. Tyumen, Flat, 2011, pp. 74—79. (In Russian).
24. Рокос С. И. Газонасыщенные отложения верхней части разреза Баренцево-Карского шельфа: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Мурманск, 2009. — 42 с.
- Rokos S. I.* Gazonasyschennyye otlozheniya verkhney chasti razreza Barentsevo-Karskogo shelfa. [Gas-saturated deposits of upper part of the section of the Barents-Kara Region]. PhD thesis. Murmansk, 2009, 42 p. (In Russian).
25. Сизов О. С. Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // Геоматика. — 2015. — № 1. — С. 53—68.
- Sizov O. S.* Dstantsionniy analiz posledstviy poverkhnostnykh gazoproyavleniy 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).
26. Сергиенко В. И., Лобковский Л. И., Семилетов И. П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Докл. Акад. наук. — 2012. — Т. 446, № 3. — С. 330—335.
- Sergienko V. I., Lobkovskii L. I., Semiletov I. P. et al.* Degradatsiya podvodnoy merzloty i razrushenie gidratov shelfa morey Vostochnoy Arktiki kak vozmozhnaya prichina "metanovoy katastrofy": nekotorye rezultaty kompleksnykh issledovaniy 2011 goda. [The degradation of submarine permafrost and the destruction of hydrates on the shelf of the East Arctic seas as a potential cause of the methane catastrophe: some results of integrated studies in 2011]. *Dokl. Akad. nauk*, 2012, vol. 446, no. 3, pp. 330—335. (In Russian).
27. Стрелецкая И. Д., Лейбман М. О., Кизяков А. И. и др. Подземные льды и их роль в формировании воронки газового выброса на полуострове Ямал // Вестн. Моск. ун-та. — Сер. 5. География. — 2017. — № 2. — С. 91—99.
- Streletskaya I. D., Leibman M. O., Kizyakov A. I. et al.* Podzemniye l'dy i ikh rol' v formirovaniy voronki gazovogo vybrosa na poluostrove Yamal. [Underground ice and its role in the formation of gas blowout crater on the Yamal peninsula]. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geography*, 2017, no. 2, pp. 91—99. (In Russian).
28. Хименков А. Н., Станиловская Ю. В., Сергеев Д. О. и др. Развитие взрывных процессов в криолитозоне в связи с формированием Ямальского кратера // Арктика и Антарктика. — 2017. — № 4. — С. 13—37. — DOI: 10.7256/2453-8922.2017.4.25094.
- Khimenkov A. N., Stanilovskaya Yu. V., Sergeev D. O. et al.* Razvitiye vzryvnykh protsessov v kriolitozone v svyazi s formirovaniyem yamalskogo kratera. [Explosive processes development in cryolithozone due to the Yamal crater formation]. *Arktika i Antarktika*, 2017, no. 4, pp. 13—37. DOI: 10.7256/2453-8922.2017.4.25094. (In Russian).
29. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИГаз, 2009. — 192 с.
- Yakushev V. S.* Prirodniy gaz i gazovyye gidraty v kriolitozone. [Natural gas and gas hydrates in cryolithozone]. Moscow, VNIIGaz, 2009, 192 p. (In Russian).
30. Andreassen K., Nilssen E. G., Degaard C. M. Analysis of shallow gas and fluid migration within the Pliocene Pleistocene sedimentary succession of the SW Barents Sea continental margin using 3D seismic data. *Geo-Marine Letters*, 2007, vol. 27, no. 2, pp. 155—171. DOI: 10.1007/s00367-007-0071-5.
31. Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M. et al. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. *Science*, 2017, 18 p. DOI: 10.1126/science.aal4500.
32. Bogoyavlensky V. Gas Blowouts on the Yamal and Gydan Peninsulas. *GeoExPro* [London], 2015, vol. 12, no. 5, October, p. 74—78.
33. Grosse G., Jones B. M. Spatial distribution of pingos in northern Asia. *The Cryosphere*, 2011, 5, p. 13—33. DOI: 10.5194/tc-5-13-2011.
34. Hovland M., Svensen H. Submarine pingoes: Indicators of shallow gas hydrates in a pockmark at Nyegga, Norwegian Sea. *Marine Geology*, 2006, 228, p. 15—23.
35. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. Cambridge, 2007. 475 p.
36. Kizyakov A., Khomutov A., Zimin M. et al. Microrelief Associated with Gas Emission Craters: Remote-Sensing and Field-Based Study. *MDPI, Remote Sensing*, 2018, 10, 677. DOI: 10.3390/rs10050677.
37. Kotlyakov V. M., Komarova A. I. Elsevier's dictionary of geography. [S. l.], Elsevier, 2007. — 1073 p.
38. Mackay J. R. Pingo Growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula area, Western Arctic Coast, Canada: a long-term field study. *Geographie physique et Quaternaire*, 1998, vol. 52, no. 3, pp. 271—323.

39. Paull C. K., Dallimore S. R., Caress D. W. et al. Active mud volcanoes on the continental slope of the Canadian Beaufort Sea. AGU — Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2015, no. 16, pp. 3160—3181, DOI: 10.1002/2015GC005928.
40. Paull C. K., Lii W. U., Dallimore S. R., Blasco S. M. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates. Geophysical Research Letters, 2007, vol. 34. DOI: 10.1029/2006GL027977.
41. Shearer J. M. et al. Submarine pingos in the Beaufort Sea. Science, 1971, vol. 175, pp. 816—818.

Информация об авторах

Богоявленский Василий Игоревич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), профессор, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: vib@pgc.su.

Сизов Олег Сергеевич, кандидат географических наук, главный специалист, АО «Российские космические системы» (127490, Москва, ул. Декабристов, вл. 51, стр. 25), доцент, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: kabanin@yandex.ru.

Богоявленский Игорь Васильевич, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), заведующий лабораторией, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

Никонов Роман Александрович, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), инженер, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

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

Библиографическое описание данной статьи

Богоявленский В. И., 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.

EARTH DEGASSING IN THE ARCTIC: COMPREHENSIVE STUDIES OF THE DISTRIBUTION OF FROST MOUNDS AND THERMOKARST LAKES WITH GAS BLOWOUT CRATERS ON THE YAMAL PENINSULA

Bogoyavlensky 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)

Sizov O. S.

“Russian Space Systems”, 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),

Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A.

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)

Kargina T. N.

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

The article was received on August 29, 2019

Abstract

For the first time 7,185 perennial frost mounds and 415 thermokarst lakes with gas blowout craters in the Arctic on the Yamal Peninsula have been identified based on the integrated interpretation of Earth remote sensing data from space and field research. The density of their distribution has been analyzed and areas of increased risk for

human life have been identified. It has been established that at this level of knowledge, the highest distribution density of hazardous objects is confined to the eastern part of the Yamal Peninsula, and the extreme zones are located in the Seyakha, North-Tambey and South-Tambey study areas. In a number of crater lakes, continuous and/or periodic gas blowouts (including powerful emissions) have been proved, indicating the volcanic genesis of eruptions. We have substantiated the necessity to expand and detail research areas in the human activity regions and to monitor the dynamics of cryolithosphere and degassing.

Keywords: *Arctic, Yamal, frost mound, thermokarst lake, degassing, gas blowout, gas emission, ignition, gas explosion, crater, funnel, mud volcano, permafrost volcano, monitoring, Earth remote sensing, RS data.*

Acknowledgements

The work was carried out according to the state assignment on the theme “Rational use of natural resources and efficient development of oil and gas resources in the Arctic and subarctic zones of the Earth” (No. AAAA19-119021590079-6) using technologies developed under the RAS Presidium Program No.1.55.

The authors are grateful to: NOVATEK PJSC, Yamal LNG OJSC and especially E. A. Kot for the continuous logistic support of field studies; NPC Geotech LLC for technical assistance in field work in 2018—2019.

Information about the authors

Bogoyavlensky Vasily Igorevich, Doctor of Engineering Science, Corresponding member of RAS, Deputy Director for Science, Chief Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: vib@pgc.su.

Sizov Oleg Sergeevich, PhD of Geography, Chief Expert, “Russian Space Systems” (51-25, Dekabristov St., Moscow, Russia, 127490), Associate Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), Senior Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: kabanin@yandex.ru.

Bogoyavlensky Igor Vasilyevich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Head of Laboratory, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

Nikonov Roman Aleksandrovich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Engineer, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

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

Bibliographic description

Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kargina T. N. Earth Degassing in the Arctic: Comprehensive Studies of the Distribution of Frost Mounds and Thermokarst Lakes with Gas Blowout Craters on the Yamal Peninsula. *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 4 (36), pp. 52—68. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68. (In Russian).

© Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kargina T. N., 2019