

Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата

В.И. Богоявленский*, И.В. Богоявленский, А.В. Кишанков, С.Г. Корниенко**,
Р.А. Никонов, О.С. Сизов

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

E-mail: *geo.ecology17@gmail.com, **spaceakm2@ogri.ru

Аннотация. Приведены результаты исследований Института проблем нефти и газа РАН по пяти направлениям: техногенная дегазация при освоении месторождений углеводородов; природная взрывная дегазация; дистанционный мониторинг концентрации метана в атмосфере; анализ антропогенных трансформаций криогенных ландшафтов; анализ распространения ресурсов нетрадиционных углеводородов на акваториях Арктики, Дальнего Востока России и прилегающих зарубежных акваториях. Разработаны новые способы и технологии мониторинга процесса разработки месторождений – сейсморазведка 4D в условиях реального времени. Показана высокая эффективность применения данных дистанционного зондирования Земли из космоса и с применением беспилотных летательных аппаратов для мониторинга изменений ландшафта, включая образование гигантских кратеров, и контроля концентрации метана в атмосфере.

Ключевые слова: Арктика, антропогенное воздействие, бугры пучения, газогидраты, дегазация Земли, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), кратеры выбросов газа, криолитозона, опасные геокриологические процессы, тундровый ландшафт

Для цитирования Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Кишанков А.В., Корниенко С.Г., Никонов Р.А., Сизов О.С. Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата // Актуальные проблемы нефти и газа. 2023. Вып. 3(42). С. 235–263. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-42.art15>

Введение

В данной статье рассматриваются в краткой форме основные результаты исследований авторов при выполнении работ по темам госзаданий Института проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН) за шестилетний период 2016–2021 гг., включая две трехлетние темы 2016–2018 гг. и 2019–2021 гг. с единым названием «Рациональное природопользование и эффективное освоение нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли», и двух этапов новой трехлетней темы «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и

субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата», утвержденной на трехлетний период 2022–2024 гг. В связи с большой актуальностью выявления, мониторинга развития и снижения угроз от различных опасных природных и техногенных процессов при освоении ресурсов полезных ископаемых в Арктике, особенно тех, которые прямо или косвенно связаны с дегазацией Земли, исследования, проводимые авторами, сохранили основные стратегические задачи и при этом были дополнены анализом возможных связей этих процессов с происходящими климатическими изменениями.

Влияние глобальных климатических изменений привело к ускоренным темпам потепления в Арктике, в результате чего активизируется деградация многолетнемерзлых пород (ММП), порождающая широкий спектр проблем, оказывающих сильное влияние на жизнедеятельность человека [1–3]. Среди них особо выделим ухудшение несущей способности грунтов и экранирующих свойств ММП на пути субвертикальной миграции газа. Также возможно усиление диссоциации газогидратов, происходящее при изменениях условий их стабильности. Все это способствует активизации газодинамических процессов, в том числе во взрывной форме, при мощных выбросах газа из ММП, в результате чего в Арктике образуются гигантские кратеры на суше и дне термокарстовых озер, исследование которых как нового опасного явления на суше Арктики началось в 2014 г. Кроме того, увеличение эмиссии парниковых газов в атмосферу может способствовать дальнейшему потеплению климата.

Вопросам экологической безопасности, рационального природопользования и эффективного освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли на суше и акваториях, включая изучение залежей газа в свободном и гидратном состояниях в верхней части разреза (ВЧР – глубины до 500–900 м), дегазации Земли, а также изменениям климата и ландшафтов в криолитозоне посвящено большое количество исследований российских и особенно зарубежных ученых [1–12]. В России, несмотря на активизацию исследований в этих направлениях в последнее десятилетие, по-прежнему наблюдается существенное отставание по вопросам выявления, изучения и картирования зон мощной дегазации Земли, оползней и других опасных

явлений, особенно сильно проявляющихся в криолитозоне Арктики, претерпевающей существенные изменения при активизировавшихся термоденудационных процессах.

Основные территории исследований авторов приурочены к регионам активного и перспективного недропользования с целью освоения ресурсов углеводородов (УВ) в арктических и субарктических зонах России (преимущественно Ямало-Ненецкий автономный округ – ЯНАО), а также соседних стран Циркумарктического мегарегиона, включая акватории Северного Ледовитого океана и прилегающую сушу. Большое внимание уделяется вопросам изучения и освоения ресурсов традиционных и нетрадиционных УВ на шельфе морей Арктики. При этом основное внимание направлено на наименее изученные российские мелководные акватории морей Восточной Сибири и Дальнего Востока (Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское), в которых не пробурено ни одной глубокой нефтегазопроисковой скважины.

Основные цели и задачи исследований заключаются в изучении опасных природных и техногенных объектов и явлений, представленных катастрофическими трансформациями ландшафтов криолитозоны, в том числе связанными с непрерывной и импульсной взрывной дегазацией Земли с образованием кратеров газовых выбросов; диссоциацией газогидратов; интенсивной деградацией и термоденудацией ММП; оползневыми и другими опасными геокриологическими процессами. При этом основной стратегической целью исследований авторов является решение важнейшей проблемы снижения риска возникновения (т. е. предотвращения) возможных катастроф, связанных с природной и техногенной дегазацией Земли при освоении ресурсов УВ на суше и акваториях Арктики [1–3].

Методы и технические средства исследований

Проводимые авторами исследования в значительной степени базируются на использовании различных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, включая радиолокационные. Наиболее широко используются космоснимки (КС) среднего (например, Sentinel и Landsat) и высокого (Keyhole, WorldView-WV, GeoEye-GE, PlanetScope, Ресурс-П, Канопус-В) разрешений [13].

Особенно важная информация получается с применением цифровых моделей рельефа (ЦМР) ArcticDEM с разрешением 2 м, построенных при фотограмметрической обработке КС высокого разрешения (WV-1, WV-2, WV-3 и GE-1) в Полярном геопространственном центре PGC (Polar Geospatial Center, www.pgc.umn.edu) Университета Миннесоты (University of Minnesota, Миннеаполис, США) [13, 14].

Для анализа концентрации метана и других парниковых газов в атмосфере используются данные спектрометра TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), получаемые со спутника Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) Европейского космического агентства ESA (European Space Agency, Париж, Франция). В геоплатформе GoogleEarthEngine данные TROPOMI/CH₄ доступны с 8 февраля 2019 г. [15, 16].

В зависимости от стоящих задач при проведении экспедиционных исследований применяется широкий арсенал геолого-геофизических методов, включая разночастотную сейсморазведку (в том числе микросейсморазведку 4D), георадиолокацию, эхолокацию, шнековое бурение неглубоких скважин, геотермию, взятие проб газа для геохимического анализа. При этом ряд

полевых исследований выполнялся в партнерстве с научными организациями, отмеченными в конце статьи.

К одному из наиболее эффективных методов экспедиционных исследований относится аэрофотосъемка, особенно с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [3, 13, 17–18]. Эти данные ДЗЗ позволяют не только сохранять и анализировать цифровые фотографии изучаемых объектов, но и строить с высокой точностью трехмерные (3D) ЦМР. Для этого используется фотограмметрическая обработка данных с применением специализированного программного обеспечения (ПО) Pix4Dmapper (Pix4D SA, Швейцария) и Agisoft Metashape Professional (Geoscan, Санкт-Петербург, Россия) [19].

Для комплексного исследования физического состояния ВЧР (мерзлое или талое) и газонасыщенности на шельфе Арктики применяются сейсмические материалы, включая полевые сейсмограммы общего пункта взрыва (ОПВ) и временные разрезы. При этом используется ПО Kingdom (IHS, США) и RadExPro (ООО «Деко-геофизика СК», Москва, Россия). При прогнозе зон стабильности газогидратов используются океанологические данные Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA) и ПО CSMHYD (CHR of Colorado School of Mines, Голден, США).

Картографические изображения и построение 3D-моделей осуществляются с применением ПО ArcGIS (ESRI, США). В нем также создана геоинформационная система «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО») [1–3, 13, 15, 17, 18], которая постоянно дополняется и совершенствуется по более чем пятнадцати тематическим разделам природных и техногенных явлений.

На рис. 1 приведены примеры пространственного отображения девяти разделов ГИС «АМО», способствующих комплексным аналитическим исследованиям различных опасных природных, техногенных и природно-техногенных процессов, многие из которых имеют прямые или косвенные причинно-следственные триггерные связи с

дегазацией Земли. Среди них особо выделим: сейсмические события (землетрясения), оползни, цунами, вулканизм, выходы-просачивания (сипы – seeps) газа и нефти, образование и деградацию мерзлоты (многолетней и сезонной) на суше и шельфе Арктики, формирование и диссоциацию залежей газогидратов и др.

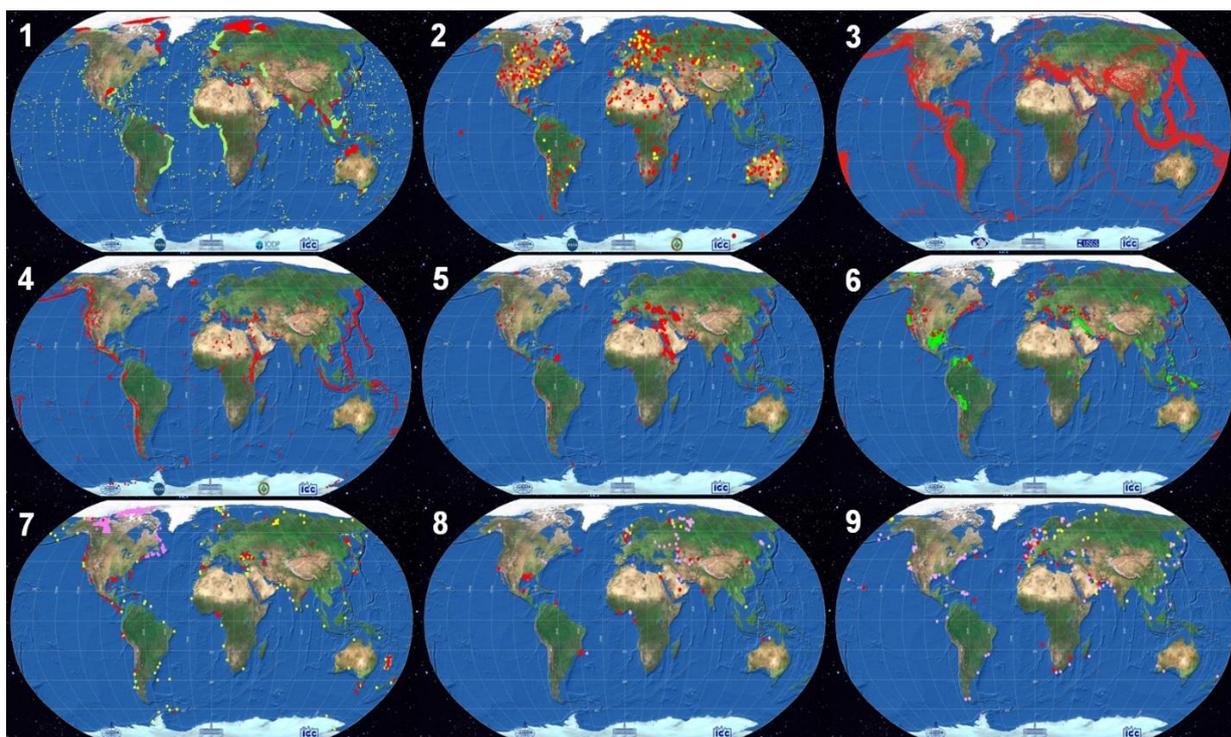


Рис. 1. Тематические разделы ГИС «АМО»:

- 1 – месторождения нефти и газа и глубоководное бурение IODP в Мировом океане; 2 – метеоритные кратеры; 3 – землетрясения; 4 – стратовулканы; 5 – грязевые вулканы; 6 – сипы нефти и газа; 7 – газогидраты; 8–9 – районы крупнейших катастроф: при добыче (8) и транспортировке (9) углеводородов [2]

Для характеристики и мониторинга антропогенных трансформаций криогенных ландшафтов в районах освоения нефтегазовых месторождений арктических и субарктических тундр в ИПНГ РАН разработана методика относительной радиометрической нормализации космических снимков, позволяющая повысить чувствительность мультивременного анализа параметров, характеризующих температуру (LST), альbedo (Alb) поверхности,

содержание хлорофилла (NDVI) и влажность (NDWI) почвенного покрова [8, 20]. Апробация методики проведена с использованием снимков со спутников Landsat на севере Западной Сибири на полуостровах Тазовский и Ямал в районах Бованенковского и Ямбургского нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ), а также на ямальском участке трассы магистрального газопровода «Бованенково – Байдаракская губа».

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследований авторов структурированы в данной статье по следующим основным направлениям: 1) техногенная дегазация; 2) природная взрывная дегазация; 3) дистанционный мониторинг концентрации метана в атмосфере; 4) анализ антропогенных трансформаций криогенных ландшафтов в районах освоения нефтегазовых месторождений; 5) анализ распространения ресурсов нетрадиционных УВ на акваториях Арктики, Дальнего Востока России и сопредельных стран.

Техногенная дегазация

Процесс разработки месторождений нефти и газа по своей сути может быть отнесен к контролируемой человеком техногенной форме дегазации недр. Однако в процессе добычи и транспортировки УВ, а также из неработающих аварийных, ликвидированных и/или законсервированных скважин могут происходить неконтролируемые утечки газа и жидких УВ, что отражено в разделах ГИС «АМО» на рис. 1 (разделы-6 (вместе с природными), 8 и 9).

Причиной утечек газа в районах устьев скважин является просачивание газа по заколонным и межколонным каналам (пустоты, макро- и микротрещины), возникшим в результате широко распространенного некачественного цементирования обсадных колонн при строительстве скважин. По данным ООО «ПСК «Буртехнологии» для большинства пробуренных скважин характерно низкое качество цементирования межколонного пространства – «около 75% всех нефтяных и газовых скважин нуждаются в ремонте по ликвидации межколонного давления сразу

после заканчивания» строительства [21]. По образующимся в цементе каналам происходит миграция УВ, в первую очередь метана, имеющего минимальные размеры молекул. Около устьев скважин, а иногда и на некоторых удалениях от них, нередко наблюдаются грифоны, приустьевые воронки и просадки грунта, особенно активно образующиеся за счет деградации ММП. В частности, на всей территории Ямбургского НГКМ «распространено грифонообразование в приустьевых частях газовых и газоконденсатных скважин» [4].

За счет заколонных и межколонных перетоков выше промышленных залежей в водоносных пластах-резервуарах могут формироваться природно-техногенные залежи (требуется утверждение данного термина в ГОСТ) с аномально-высокими пластовыми давлениями (АВПД) и, возможно, даже со сверхвысокими (сверхлитостатическими) давлениями (СВД). Наличие залежей с АВПД и СВД угрожает мощными выбросами газа, грифонами, грязевулканическими извержениями и неконтролируемыми многомесячными и даже многолетними катастрофическими фонтанами, загрязняющими экосистему и приводящими к большим потерям запасов УВ [1–3, 22, 23]. Имеются подтверждения о выходах газа в радиусе до 5–7 км от устьев аварийных скважин, при этом площадь природно-техногенных залежей может достигать 80–150 км².

На основе исследований авторы пришли к выводу, что непосредственно перед началом освоения морских месторождений необходимо проведение новых детальных исследований ВЧР на участках планируемой установки морских нефтегазодобывающих платформ или строительства искусственных островов.

Это обусловлено тем, что из-за возможных техногенных перетоков газа по заколонным и межколонным пространствам ранее пробуренных поисково-разведочных скважин вблизи их стволов в ВЧР весьма вероятно сформировались природно-техногенные залежи газа с АВПД или СВД, отсутствие информации о которых может привести к аварийным и даже катастрофическим ситуациям. В частности, авторы настоятельно рекомендуют ПАО «Газпром» проведение новых исследований ВЧР до начала установки ледостойкой стационарной платформы ООО «Газпром добыча Ямбург» на месторождении Каменно-мысское море в Обской губе, на котором скважины были пробурены 15–23 года назад.

Своевременное выявление и мониторинг развития опасных природных и природно-техногенных залежей газа (в первую очередь, метана) и жидких УВ в ВЧР является одной из важнейших проблем, связанных с безопасностью нефтегазового производства и работающего персонала. Из-за выбросов и взрывов газа пострадали и/или полностью разрушены многие сотни буровых установок на суше и акваториях Мирового океана и нанесен огромный урон нефтегазовым промыслам, экосистеме и экономике нефтегазодобывающих стран [1–3]. Отметим, что в результате катастрофы 2010 г. буровой платформы «Deepwater Horizon» в Мексиканском заливе рекордные по размерам штрафы, выплаченные компаниями BP, Transocean и Halliburton, превысили 71 млрд долларов (BP – около 96% штрафов). Это соизмеримо или даже превышает величину капитализации гигантов отечественной нефтегазовой отрасли ПАО «Газпром» и ПАО «НК «Роснефть».

Авторами созданы новые способы и комплексные геофизические технологии

выявления и мониторинга развития опасных геологических процессов, преимущественно связанных с субвертикальной природной и техногенной миграцией газа и базирующихся на различных геофизических принципах, в том числе сейсмическом мониторинге (сейсморазведка 4D) в условиях, близких к реальному времени (патенты РФ 2539745, 2540005, 2544948, 2579089, 2602735, 2621638, 2691630, 2761052). При этом часть разработок выполнена в партнерстве со специалистами ряда предприятий, включая ПАО «Газпром» и ООО «Газпром добыча Ямбург», АКИН АО «Концерн «Моринсис-Агат» и АО «ЦКБ МТ «Рубин». Необходимо отметить, что сейсморазведка 4D в условиях, близких к реальному времени, по своей сути дает возможность мониторинга подводной обстановки, что повышает безопасность функционирования промыслов от возможных террористических атак, что в настоящее время после взрывов экспортных подводных магистральных газопроводов в 2022 г. в Балтийском море стало весьма актуальным.

Современные технические средства позволяют осуществлять не только прямой контроль (мониторинг) утечек УВ с помощью наземного и подземного оборудования, но и использовать для этих целей различные данные ДЗЗ из космоса. На основе анализа данных ДЗЗ авторами были обследованы районы крупных катастрофических событий, связанных с неконтролируемыми выбросами УВ не только в различных регионах бывшего СССР (южные и арктические регионы России, Туркменистан, Казахстан), но и в ряде других стран, включая США, Канаду, Мексику, Индонезию и др. При этом было установлено, что в местах многих катастроф десятилетиями продолжается эмиссия газа, а в некоторых случаях и жидких пластовых флюидов (вода и УВ) [22, 23].

В качестве одного из ярких примеров вышесказанного приведем одну из наиболее серьезных катастроф, произошедших в Арктике в ноябре 1980 г. при проведении испытания разведочной скважины в Ненецком автономном округе в районе устья реки Печора на левом берегу протоки Малый Гусинец в северной части крупного Кумжинского газоконденсатного месторождения (ГКМ), открытого в 1973 г. [22]. Здесь 25 мая 1981 г. для ликвидации неконтролируемого мощного выброса (фонтана) смеси газообразных и жидких УВ в специально пробуренной скважине был применен подземный ядерный взрыв «Пирит» мощностью 37,6 килотонны (прак-

тически равно суммарной энергии взрывов в Хиросиме и Нагасаки), который лишь ухудшил ситуацию. Из-за образовавшейся в ВЧР природно-техногенной залежи площадью около 30 км² (зафиксированы выходы газа в радиусе до 3 км) газ вырывался в атмосферу в ряде мест, в том числе вблизи скважин № 5, 9, 10 и 134. В итоге в районе аварийной площади размером 260 × 600 м около разрушенных устьев этих скважин образовались три гигантских кратера диаметром от 70 до 130 м, затопленные речной водой (рис. 2А). Побережья протоки Малый Гусинец, Коровинской и Печорской губ Печорского моря были загрязнены жидкими УВ, при этом сильно пострадала ихтиофауна.

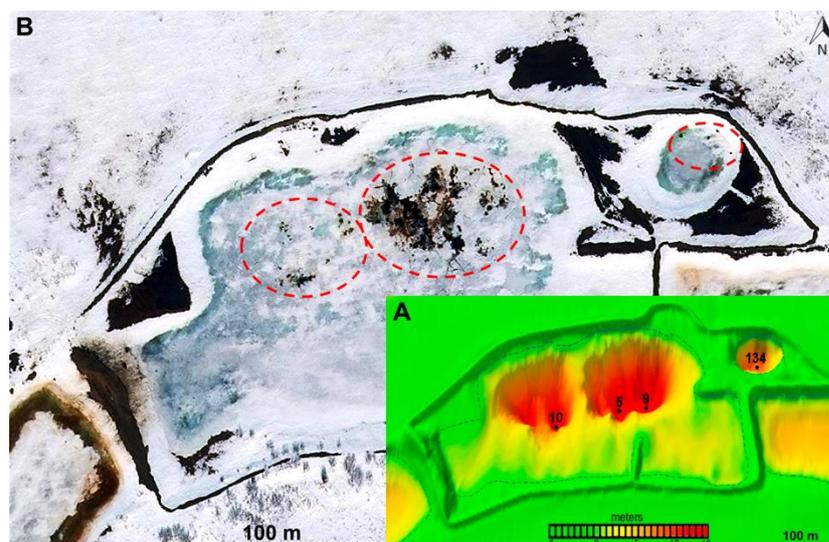


Рис. 2. Катастрофа на Кумжинском месторождении: А – 3D-модель рельефа местности и дна техногенного водоема с кратерами; В – космоснимок WorldView-2 2 мая 2016 г. [22]

Тяжелая борьба с катастрофическим фонтанированием на севере Кумжинского ГКМ продолжалась около шести с половиной лет (2362 суток), фонтан был погашен лишь 18 мая 1987 г. [22]. В районе катастрофы на протоке реки Печора создан закрытый дамбами водоем, в котором постоянно выделяются жидкие и газообразные УВ, что наглядно видно на космоснимке WorldView-2 в виде проталин/пробоин во льду и его загрязнений жидкими УВ (рис. 2В).

Кроме исследований аварийных утечек и катастрофических выбросов УВ, обусловленных вмешательством человека в недра Земли посредством скважин, авторами проведен анализ последствий техногенной дегазации, проявляющихся в виде катастрофических проседаний земной поверхности и разрушительных сейсмических событий (индуцированных землетрясений) на месторождениях Wilmington, Groningen, Ekofisk [1–3, 24, 25].

Также рассмотрены хронология, причины и последствия ряда катастроф при транспортировке УВ с использованием танкеров и трубопроводов [25, 26], включая исследования по данным ДЗЗ разлива нефти при аварии на терминале Каспийского трубопроводного консорциума в Черном море 12 августа 2021 г. и первого в России выброса, взрыва и длительного горения широкой фракции легких УВ из подводного трубопровода компании «СибурТюменьГаз» (февраль–март 2021 г.).

Природная взрывная дегазация

В 2014–2023 гг. на севере Западной Сибири было обнаружено около 20 гигант-

ских кратеров газового выброса (рис. 3) [1–3, 13, 15, 17, 18, 25]. Некоторые из них расположены непосредственно на территории Бованенковского НГКМ, всего в нескольких километрах от магистрального газопровода высокого давления «Бованенково–Ухта» и вблизи от железной дороги на Ямале «Обская–Карская» ПАО «Газпром». При взрывах разлет крупных кусков породы достигал 300–900 м. Выбросы газа и образование Антипаютинского, Сеяхинского и Еркутинского кратеров в 2013–2017 г., а также Северо-Бованенковского кратера в 2023 г. (С3, С11, С12 и С21 в ГИС «АМО») сопровождалось самовоспламенениями газа, что повышало взрывоопасность.

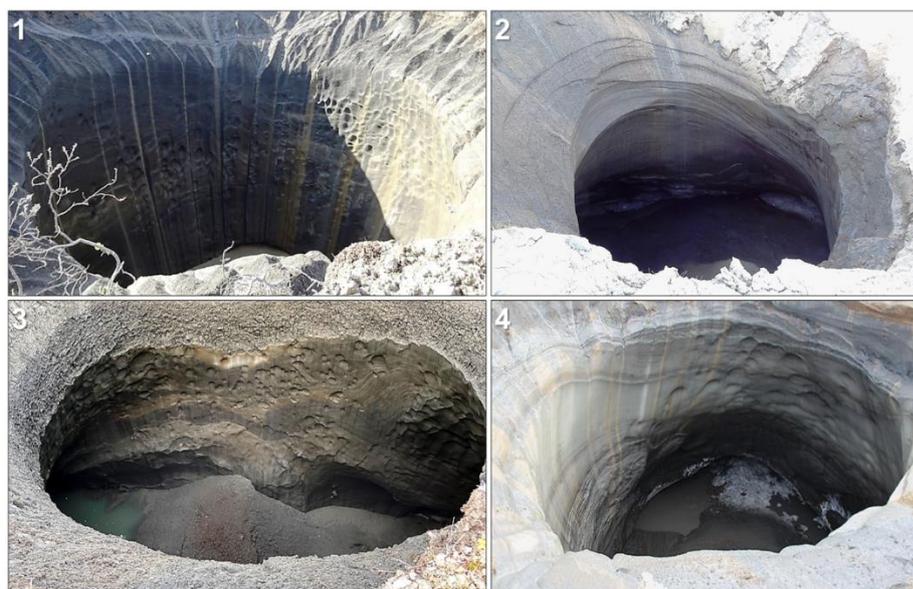


Рис. 3. Гигантские полости в массивах подземного льда, обнажившиеся после выбросов/взрывов газа на объектах севера Западной Сибири: 1 – С1; 2 – С12; 3 – С17 на полуострове Ямал; 4 – С3 на полуострове Гыданский [27]

В 2021 г. руководством Российской академии наук признано важнейшим достижением обоснование генезиса взрывной дегазации Земли в Арктике, разработанное авторами: «впервые установлены закономерности формирования опасных газонасыщенных объектов в криолитосфере Земли: газодинамического роста

многолетних бугров пучения, мощных выбросов, самовоспламенений и взрывов газа с образованием гигантских кратеров» [28, с. 348–349], которое также вошло в Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году», изданный Минприроды РФ в 2021 г. [29, с. 788].

В результате исследований было обосновано, что до взрывов под землей существовали наполненные газом со сверхлитостатическим давлением огромные (многие тысячи кубометров) термокарстовые полости в массивах подземного льда (см. рис. 3), возникшие в местах его плавления снизу под локальным эндогенным влиянием теплового потока и/или термосуффозии [2, 27]. При этом на поверхности Земли под газодинамическим воздействием (АВПД и СВД) формировались многолетние бугры пучения (МБП), которые взрывались при преодолении давлением газа упруго-прочностных свойств мерзлых грунтов. Очевидно, что до взрывов в полостях существовали СВД, многократно превышающие литостатические давления, что подтверждено математическим моделированием и физическими экспериментами в песчаных средах [2, 3, 27].

Уникальная информация была получена в августе 2020 г. при изучении Бованенковского кратера С17 (фото с бруствера кратера приведено на рис. 3.3) в результате фотограмметрической обработки аэрофотоснимков, сделанных авторами с БПЛА DJI Mavic Pro на двух уровнях полета (в том числе внутри кратера на 15 м ниже поверхности Земли). При этом построена цифровая 3D-модель рельефа местности, кратера и подземной полости (глубина дна до 35 м), сформировавшейся в массиве ледогрунта [2, 17, 26, 27]. Характерный вид кратера и полости объекта С17 на физической 3D-модели, изготовленной на 3D-принтере из пластика (рис. 4), может быть объяснен только эндогенным генезисом полости с подтоком газа по разлому субмеридиональной ориентации и/или по газопроницаемым пластам в толще ММП с криопэгами [2, 17, 27].



Рис. 4. Физическая 3D-модель подземной полости и кратера выброса газа на Бованенковском объекте С17 в двух видах: А – общий вид сверху; В – модель в разрезе и фото БПЛА

В процессе комплексных исследований различных объектов дегазации недр было впервые обосновано, что одной из основных причин самовоспламенений и взрывов газа при его мощных природных и техногенных выбросах (например, на объектах С3, С11, С12 и др.) и сильных извержениях грязевых вулканов является электризация окружающего пространства и электростатические разряды, возникающие при фонтанировании

струи газа с неоднородными частицами в воздушной среде и/или выходе газа через водную толщу [2, 3, 27].

В результате экспедиционных и дистанционных мониторинговых исследований на ряде обнаруженных и изученных объектов обоснован вулканический (постоянный и/или периодический) характер извержений (например, на объектах С3, С11 и термокарстовом озере Открытие) [2, 27, 30].

Кроме кратеров выбросов газа на суше, на основе дешифрирования аэрокосмических данных на севере Западной Сибири (включая полуострова Ямал, Гыданский и Тазовский) площадью около 348 тыс. км² (46,4% территории ЯНАО) авторами выявлено более 14 тысяч МБП, часть которых является потенциально газорывоопасными. Это практически на порядок (в 8,6–9,8 раз) больше, чем во всех других подобных исследованиях данного региона, включая [31, 32].

Дополнительные исследования на севере Западной Сибири были проведены для выявления по данным ДЗЗ (космоснимки высокого разрешения в оптическом диапазоне частот) термокарстовых озер с кратерами выбросов газа (ТОКВГ), с валидацией в ходе экспедиционных полетов на вертолетах (рис. 5). На многих ТОКВГ, как и на акваториях Мирового океана, зафиксированы выходы метана в виде потоков пузырей (газовые факелы), нередко выходящие из кратеров (покмарок) [25, 30, 33].

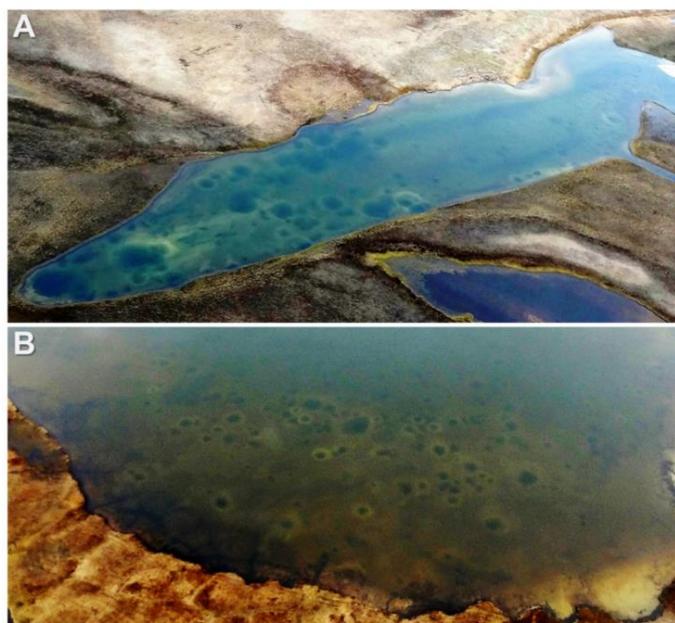


Рис. 5. Аэрофотоснимки из вертолета двух термокарстовых озер (А и В) с кратерами выброса газа на дне, обнаруженных в Сеяхинском районе вблизи кратера С17 (автор – В.И. Богоявленский, 2 июля 2017 г.)

В итоге специальных исследований в Сеяхинском районе ряда термокарстовых озер с применением ДЗЗ из космоса и проверки полученных данных с борта вертолета впервые доказана большая мощность выбросов газа со дна арктических термокарстовых озер, способных разбить лед толщиной 1–1,5 м, сформировать крупные зоны его деструкции диаметром в десятки метров (по факту до 15–45 м) и разбросать крупные глыбы льда на удаления свыше 50 м от эпицентра взрыва [2, 27, 30].

Экспедиционные исследования «Ямал – 2019» термокарстового озера с кратерами выбросов газа Открытие (название дано авторами в связи с высокой значимостью полученных результатов) дополнительно подтвердили сделанные выводы.

Имеются основания считать, что мощные выбросы газа на озере Открытие и других местах образования гигантских кратеров преимущественно происходят из неглубоко залегающих залежей со сверхлитостатическими пластовыми давлениями.

В 2023 г. на дне арктических термокарстовых озер в центральной части полуострова Ямал по данным ДЗЗ высокого разрешения были впервые обнаружены крупные обособленные поднятия, идентифицированные авторами как грязевулканические постройки с явно выраженными кратерами [34, 35]. На основе мониторинга обстановки по ретроспективным космоснимкам Sentinel-2 на озерах Открытие, Лабварто и Ямбуто доказано наличие периодических выбросов пластовых флюидов. По совокупности ряда признаков обнаруженные объекты с высоким уровнем вероятности могут быть отнесены к активным грязевым вулканам. Во время экспедиции «Ямал – 2023» с вершины грязевулканической постройки в озере Лабварто были собраны разновозрастные образцы грязевулканической постройки. Результаты комплексных исследований различных арктических регионов, включая полуостров Ямал, позволяют утверждать, что в Циркумарктическом мегарегионе широко распространен грязевой вулканизм.

На основе комплексного анализа данных ДЗЗ и экспедиционной валидации результатов установлено, что все перечисленные выше объекты вносят существенный вклад в общую эмиссию метана в Арктике [15]. По космоснимкам высокого разрешения по состоянию на ноябрь 2023 г. на севере Западной Сибири выделено 5337 тысяч зон активной дегазации недр со дна 3978 ТОКВГ, 16 рек и 155 заливов и прибрежных зон Карского моря. При этом в ряде термокарстовых озер количество кратеров исчисляется многими сотнями и даже тысячами, а их диаметры изменяются от десятков сантиметров до 15–20 м.

Для севера Западной Сибири в результате комплексного площадного статистического анализа распространения

более 19 тысяч потенциально опасных объектов (МБП, ТОКВГ и др.) созданы картографические схемы, иллюстрирующие их связь с эндогенными и экзогенными процессами, включая взрывную дегазацию Земли. При этом составлена региональная схема условного риска выброса газа, по которой с учетом выявления наибольшей плотности распространения МБП и ТОКВГ в 2020 г. впервые обосновано, что «наиболее газозрывоопасной является восточная часть Ямала, где выделены Южно-Тамбейская (Сабеттинская) и Сеяхинская экстремальные зоны» [15]. Сделанные выводы подтверждены данными спектрометра TROPOMI со спутника Sentinel-5P, в результате чего в 2021 г. данный результат был признан РАН важнейшим достижением за 2020 г. [28]. В 2022 г. подобные экстремальные зоны повышенного риска выброса газа были обнаружены на севере Гыданского полуострова вблизи завода «Арктик СПГ 2» (пос. Утренний) и на Уренгойско-Самбургской площади.

Дистанционный мониторинг концентрации метана в атмосфере

В последнее десятилетие резко возрос интерес к изучению процессов эмиссии парниковых газов в атмосферу, среди которых одним из наиболее сильных является метан [15, 31–37]. Начиная с 2007 г. наблюдается устойчивый рост концентрации метана в атмосфере (КМА) Земли, возобновившийся после периодов снижения темпов роста КМА в 1984–1998 гг. и временной стабилизации в 1999–2006 гг. (около 1770 ppb) [33]. Понимание причин этих изменений и роли растущей КМА имеет большое значение в свете предпринимаемых в мире попыток замедления процесса потепления климата.

В результате исследований КМА в 2019 г. в Арктической зоне Российской Федерации по данным спектрометра TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) авторами были выявлены природные аномальные зоны на Севере Западной и Восточной Сибири и дано объяснение их возможного генезиса [15]. Анализ причин локальных аномалий повышенной КМА, зафиксированных TROPOMI в 2019 г. на полуострове Ямал [15, 33], показал их общую региональную связь с распространением выделенных по данным ДЗЗ зон активной дегазации дна ТОКВГ [15].

В 2022 г. впервые по данным спектрометра TROPOMI был выполнен комплексный мониторинговый анализ КМА

над сушей Циркумарктического мегарегиона в 2019, 2020 и 2021 гг. [33]. В целом установлено, что, несмотря на аномально высокие темпы роста средних температур воздуха в Арктике, средняя КМА в мегарегионе все три года росла, но была ниже глобальной на 2–2,5%.

Сравнительный анализ изменений КМА в различные годы наблюдений с выявлением разномасштабных аномалий и трендов возможен путем расчета разностных массивов разновременных данных. На рис. 6 приведено пространственное распределение изменений КМА в Циркумарктическом мегарегионе в 2020 и 2021 гг. по сравнению с 2019 г. (рис. 6А и 6В), а также в 2021 г. по сравнению с 2020 г. (рис. 6С) [33].

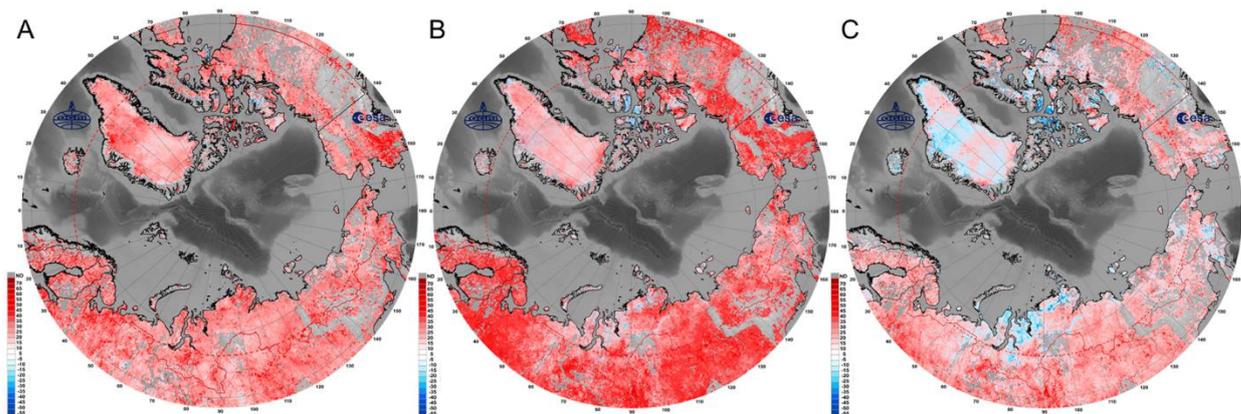


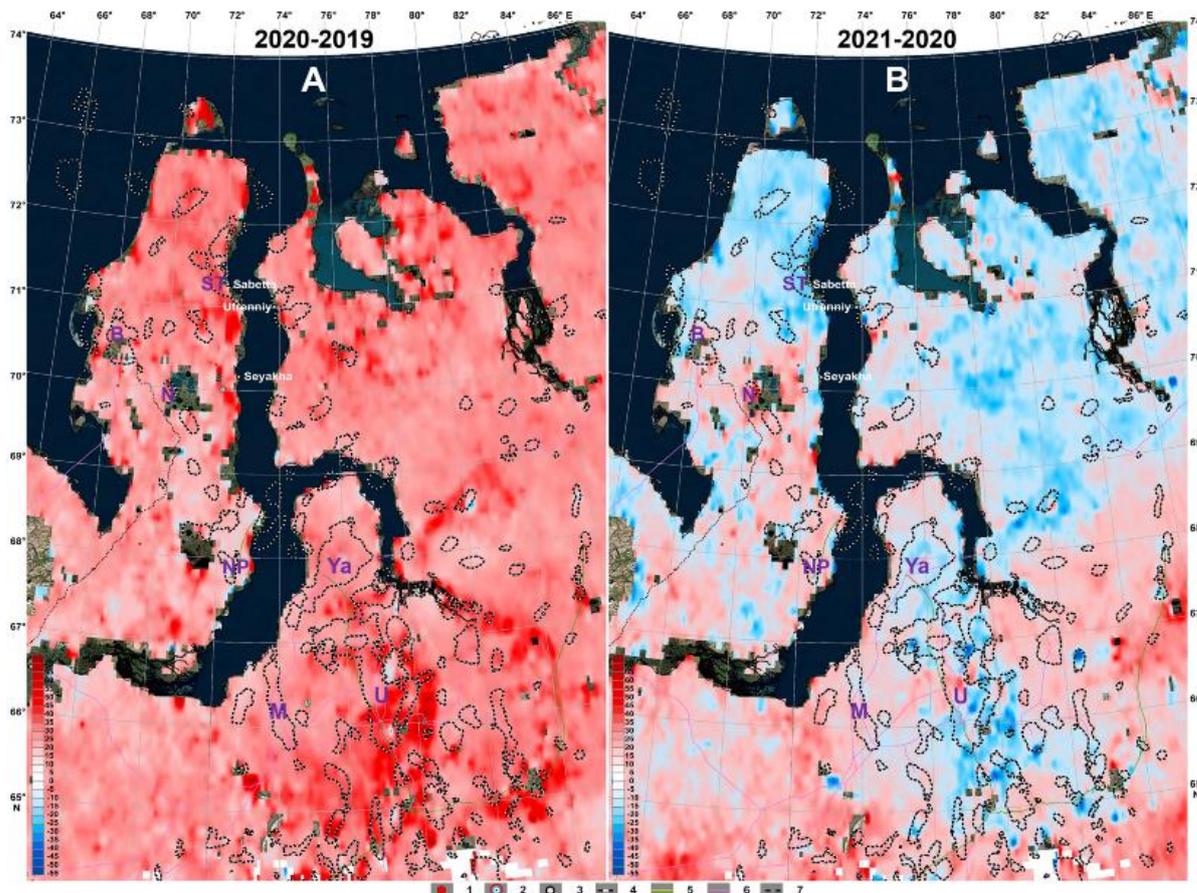
Рис. 6. Пространственные распределения аномалий концентраций метана (ppb) в атмосфере Циркумарктического мегарегиона: А – в 2020 г. по сравнению с 2019 г.; В – в 2021 г. по сравнению с 2019 г.; С – в 2021 г. по сравнению с 2020 г. Картографическая основа – GEBCO [33]

Отметим, что разностные массивы КМА на рис. 6 приведены в единой цветовой легенде от минимального (–55 ppb) до максимального (+70 ppb) значений. Благодаря этому хорошо виден преимущественный рост КМА в 2020 и 2021 гг. относительно уровня 2019 г. Однако в 2021 г. (см. рис. 6В) в ряде районов Арктики (часть Таймыра, а также некоторые острова Канадского Арктического архипелага) наблюдается снижение КМА

ниже уровня 2019 г. Сравнение КМА 2021 г. по отношению к 2020 г. (см. рис. 6С) в основном показало небольшой рост, однако значительные участки суши характеризуются снижением КМА (например, север Западной Сибири, частично Гренландия, ряд островов Канадского Арктического архипелага), что стало неожиданным результатом и потребовало провести дополнительные исследования.

Анализ региональных изменений КМА для севера Западной Сибири выявил их преимущественную связь с колебаниями температуры воздуха вблизи поверхности Земли, при этом в летне-осенние периоды 2020 г. установлено повышение средних значений КМА (рис. 7А), а в 2021 г. –

их понижение (рис. 7В), связанное с региональным похолоданием, установленным по комплексу данных отечественных метеорологических станций, NASA (National Aeronautics and Space Administration, США) и NSIDC (National Snow and Ice Data Center, США).



Условные обозначения:

- 1 – кратеры выбросов газа; 2 – озеро Открытие; 3 – города;
- 4 – месторождения углеводородов: В– Бованенковское, N– Нейтинское, NP–Новопортовское, ST– Южно-Тамбейское, Ya– Ямбургское, U– Уренгойское, M– Медвежье;
- 5 – нефтепроводы; 6 – газопроводы; 7 – железная дорога на Ямале

Рис. 7. Изменения концентрации метана в атмосфере севера Западной Сибири в летне-осенние периоды: А – 2020 г. по сравнению с 2019 г.; В – 2021 г. по сравнению с 2020 г.

По мнению авторов, за счет существенного снижения температуры вблизи поверхностей Земли и термокарстовых озер, рек и Карского моря в 2021 г. (на 4–4,5 °С по сравнению с 2020 г. [33]) уменьшилась эмиссия в атмосферу метана, растворенного и накопленного в водной

среде. Также отметим, что в 2021 г. на фоне регионального понижения КМА зафиксировано ее локальное повышение в центральной части полуострова Ямал (см. рис. 7В), которое, видимо, связано с миграцией глубинного газа по разломам, в том числе в районе Нейтинского НГКМ.

Анализ антропогенных трансформаций криогенных ландшафтов в районах освоения нефтегазовых месторождений

Разработка месторождений углеводородов в арктических и субарктических районах приводит к неизбежным, а зачастую необратимым изменениям состояния ландшафтов и нарушению стабильности геокриологических условий. В этой связи актуальны исследования, характеризующие степень и вероятные последствия антропогенного воздействия на криогенные ландшафты, в том числе с учетом существующих климатических трендов. Оценка подобных изменений может проводиться на основе ретроспективного анализа данных ДЗЗ [6, 8, 10, 12, 38]. В ИПНГ РАН разработана методика относительной радиометрической нормализации изображений, построенных на основе данных ДЗЗ, позволяющая повысить чувствительность мультитременного анализа данных при оценке антропогенных трансформаций ландшафта за счет снижения факторов (погрешностей), не связанных с изменением состояния поверхности земли [8, 20].

В районе Бованенковского НГКМ исследования проводились с использованием космоснимков Landsat за период 1988–2020 гг. на основе параметров, характеризующих температуру поверхности (LST), альбедо (Alb), содержание хлорофилла (NDVI) в напочвенном покрове и влажность (NDWI) на его поверхности [8]. В районе наиболее длительной разработки (на южном своде месторождения) отмечается значимый рост LST и снижение NDWI в пойменной части, что свидетельствует о доминировании процессов дренирования поверхности земли, которое на фоне глобального климатического тренда может быть дополнительным

фактором увеличения глубины деятельного слоя и деградации ММП. Тренды Alb и NDVI в этом районе не значимы, что указывает на отсутствие преобладающих тенденций изменения состояния растительности, связанных с антропогенным воздействием нефтегазового промысла.

По данным спутников Landsat за период 1988–2019 гг. на участке наиболее длительной разработки Ямбургского НГКМ в границах III морской террасы выявлены значимые тенденции роста NDVI, Alb и NDWI, характеризующие развитие растительности как реакции на нарушения напочвенного покрова, произошедшие здесь до 1988 г. [39]. Изменения могут быть также следствием формирования локального микроклимата, обусловленного влиянием техногенных объектов, что, в свою очередь, может привести к усилению процессов деградации ММП и росту эмиссии биогенных газов [40]. На участке длительной разработки Ямбургского НГКМ выявлено существенное (на 19%) снижение суммарной площади термокарстовых водоемов, что может быть связано с активизацией процессов эрозии и изменением поверхностного стока в результате строительства технических объектов [41].

На ямальском участке трассы двух магистральных газопроводов высокого давления «Бованенково – Байдарацкая Губа» исследования проводились с использованием космоснимков Landsat за период 2009–2020 гг. [42]. В год укладки трубопроводов непосредственно над ними средние значения параметров NDVI, NDWI и Alb резко снижаются, а через 5–7 лет индексы NDVI и NDWI стабилизируются до первоначальных величин. За этот же период анализа Alb повышаются на 13–15% относительно начального уровня.

По анализируемым параметрам признаки нарушения и восстановления напочвенного растительного покрова не фиксируются на расстоянии более 70–90 м от центральной оси каждого из трубопроводов. К концу периода наблюдений не отмечаются какие-либо доминирующие тенденции изменения параметров, свидетельствующие о трансформациях ландшафта, при которых повышается вероятность деградации ММП и дестабилизации состояния трубопроводов.

Помимо задач выявления доминирующих тенденций изменения биофизических свойств поверхности, применение разработанной методики позволяет картографировать локальные аномальные изменения параметров вблизи технических объектов на любом выбранном временном интервале. Многопараметрический анализ нормализованных изображений позволяет более достоверно характеризовать тип локальных трансформаций поверхности и прогнозировать наиболее вероятные изменения состояния мерзлых грунтов.

Анализ распространения ресурсов нетрадиционных углеводородов на акваториях Арктики, Дальнего Востока России и сопредельных стран

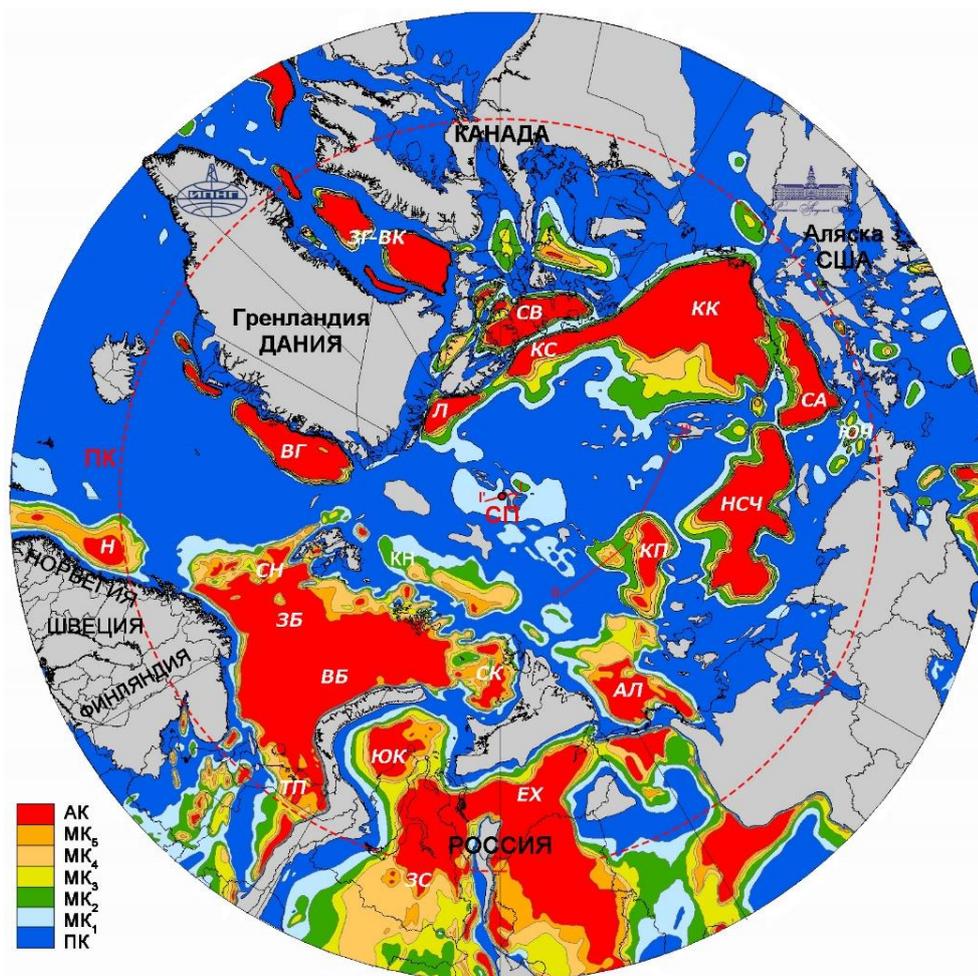
В ИПНГ РАН длительное время проводится широкий комплекс исследований нефтегазоносности осадочной толщи на акваториях морей Циркумарктического мегарегиона и Дальнего Востока. При этом в дополнение к исследованиям традиционных залежей УВ большое внимание уделяется анализу распространения нетрадиционных углеводородов, включая потенциальную нефтегазоносность разновозрастного консолидированного и кристаллического фундамента глубоководных и шельфовых

зон, залежи газа в свободном и гидратном состояниях в ВЧР шельфа и континентального склона с учетом новых геолого-геофизических и геохимических данных [43–46].

Проведенные исследования позволили уточнить модели строения разновозрастного акустического фундамента и мощности осадочного чехла. При этом впервые была построена схема (карта) катагенетической преобразованности нефтематеринских толщ нижней части нефтегазоносных и потенциально нефтегазоносных бассейнов (НГБ и ПНГБ) арктических акваторий и прилегающей суши России, Норвегии, Дании, Канады и США (рис. 8) [43].

Установлено, что осадочные породы нижней части ряда седиментационных бассейнов находятся в зонах мезо- и апокатагенеза, что позволяет сделать вывод о наличии в вышележащих отложениях продуктивных интервалов в нефтяных и газовых окнах генерации УВ. В итоге, на рис. 8 красный, желтый, зеленый и голубой цвета отображают наиболее нефтегазоперспективные зоны в порядке значимости, синий цвет – частично газоперспективные зоны маломощного осадочного чехла, а серый цвет – бесперспективные зоны.

На основе исследований ряда эталонных месторождений в фундаменте (например, Белый Тигр и Дракон в Кылулонгском бассейне Южно-Китайского моря [47]) разработана специальная технология поиска подобных нефтегазоносных объектов в других регионах. В результате ее применения впервые была создана схема размещения зон потенциальной нефтегазоносности кристаллического и консолидированного фундамента шельфа и сопредельной суши Восточного полушария Арктики [43].

**Условные обозначения:**

СП – Северный полюс; ПК – Полярный круг;

НГБ: ЗБ – Западно-Баренцевский, ВБ – Восточно-Баренцевский, ТП – Тимано-Печорский,

ЮК – Южно-Карский, ЕХ – Енисей-Хатангский, СА – Северо-Аляскинский, БМ – Бофорт-Маккензи,

СВ – Свердрупский, ЗГ-ВК – Западно-Гренландский – Восточно-Канадский;

ПНГБ: СК – шельфа Северо-Карский, АЛ – Анабаро-Лаптевский, НСЧ – Новосибирско-Северо-Чукотский,

ЮЧ – Южно-Чукотский, ВГ – Восточно-Гренландский (ВГ), Н – Норвежский (Н);

ПНГБ котловин: КН – Нансена, КА – Амундсена, КМ – Макарова, КП – Подводников, КК – Канадской

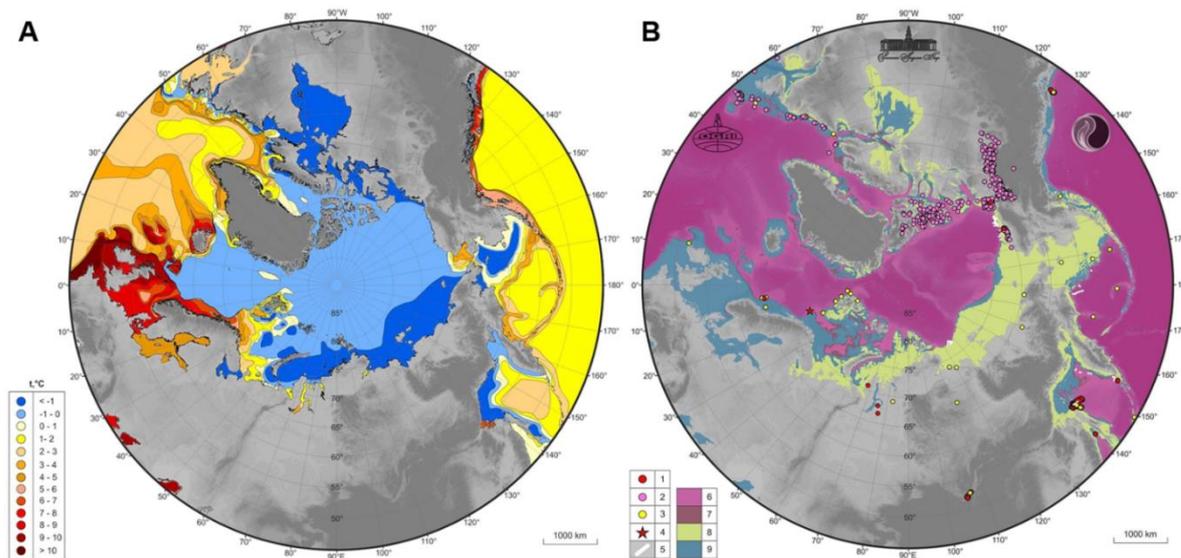
Рис. 8. Катагенез нижней части седиментационных бассейнов Циркумарктического мегарегиона [43]

В 2016–2022 гг. был обоснован высокий уровень природных опасностей в Арктике и Мировом океане в условиях меняющегося климата, обусловленных наличием в нем криогидро- и криолитозон с широким распространением газогидратов [37, 45, 46]. На основе данных более 622,5 тыс. станций зондирования получены распределения температур воды вблизи дна на акваториях Циркумарктического мегарегиона, выявлены зоны с благоприятными термобарическими

условиями для образования и сохранения газогидратов (рис. 9) [45]. Кроме того, при анализе более 44 тыс. пог. км временных разрезов МОГТ (метода общей глубинной точки) АО «МАГЭ» и АО «ДМНГ» (Россия) и Геологической службы США USGS на ряде акваторий выявлены и закартированы природные опасные объекты: неоднородности в строении ВЧР, связанные с их газонасыщенностью и ледовой экзарацией придонных отложений;

отражающие горизонты BSR¹ (Bottom Simulating Reflector) от подошвы потенциально газогидратонасыщенных отложений, в том числе выявленные впервые на континентальном склоне моря Лаптевых и во впадине ТИНРО в северной части

Охотского моря (см. рис. 9) [44–46]. Результаты мегарегионального прогноза распространения газогидратов были включены руководством РАН в список важнейших научных достижений 2018 г. [48, с. 244–245, 534].



Обозначения для В:

- 1 – газогидраты подтверждены образцами со дна и из скважин;
- 2 – высоковероятный прогноз газогидратов по каротажу скважин;
- 3 – BSR и другие косвенные признаки газогидратов;
- 4 – грязевой вулкан Наакоп Mosby с газогидратами;
- 5 – зоны BSR в морях Лаптевых, Бофорта, Беринговом и Охотском;
- 6, 7 и 8 – зоны благоприятных термобарических условий существования газогидратов вне (6 и 7) и внутри (8) границ существования субаквальных ММП;
- 9 – отсутствие условий для формирования и существования газогидратов на акваториях

Рис. 9. Циркумарктический мегарегион: картографические схемы распределения температур воды вблизи дна (А) и прогноза зон распространения газогидратов (В) [46]

Потенциальные залежи газа в ВЧР, находящиеся в свободном и/или гидратном состояниях, выявлялись при интерпретации архивных временных разрезов МОГТ на мелководном (до 120 м) шельфе морей Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского, Бофорта, Берингова и Охотского в районах существования и отсутствия субаквальных ММП [44, 49, 50]. При этом анализировались глубины распространения верхних залежей и их латеральные размеры.

Данные исследования позволят не только закартировать потенциально опасные газонасыщенные объекты, но и уточнять структурные построения за счет коррекции статических и кинематических искажений, выявлять зоны миграции и аккумуляции УВ в ВЧР и более глубоких горизонтах. При общем объеме проанализированных временных разрезов МОГТ АО «МАГЭ», АО «ДМНГ» и USGS (суммарно более 44 тыс. км) было выделено свыше 2,3 тыс. потенциально газонасыщенных объектов (рис. 10).

¹ BSR – псевдодонный отражающий горизонт, отождествляемый с наличием газогидратов.

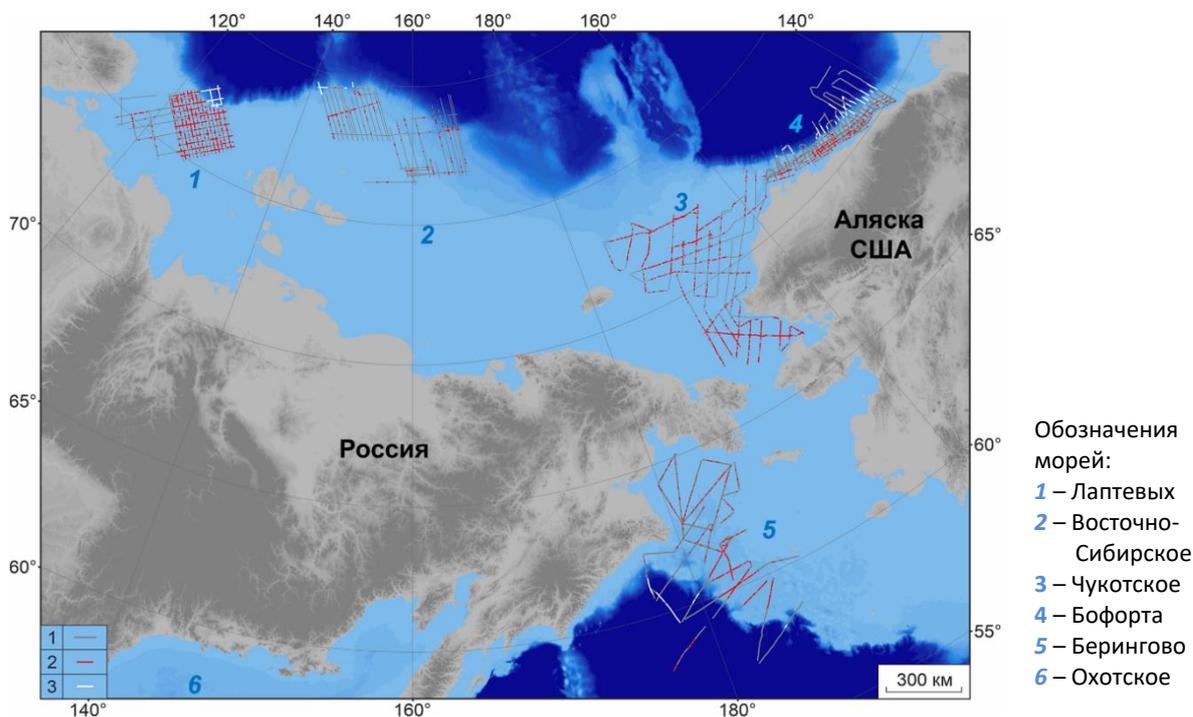


Рис. 10. Результаты выделения по временным разрезам МОГТ (1) потенциальных залежей газа в ВЧР в свободном (2) и гидратном (3) состояниях

При подготовке морских площадей для установки нефтегазодобывающих платформ и/или строительства искусственных островов в арктических и субарктических условиях совершенно необходима информация о физическом состоянии грунтов (упруго-прочностных свойствах), особенно о наличии или отсутствии ММП и газогидратов. Решение этой задачи по записям преломленных волн, регистрируемым в первых вступлениях сейсмограммам ОПВ (общий пункт взрыва) [50–52], представляется наиболее достоверным и легко доступным методом, который рекомендуется для широкого применения на этапе, предшествующем началу освоения морских месторождений на мелководье. При этих исследованиях нет необходимости в постановке специальных полевых работ, так как необходимая информация может быть получена по архивным материалам МОГТ 2D и 3D.

В связи с вышесказанным отдельное направление исследований авторов посвящено комплексному анализу распространения

площадей наличия и отсутствия субаквальных ММП и газогидратов по исходным записям преломленных волн на сейсмограммах ОПВ. Такие работы проведены на акваториях морей Лаптевых и Восточно-Сибирского (до изобаты 120 м) с использованием архивных данных АО «МАГЭ» [49–52]. Результаты расчетов показали, что в море Лаптевых ММП сохранились на 81,2% исследованных центрального и восточного районов акватории, а в Восточно-Сибирском море – лишь на 37,8% исследованного северо-западного района. С учетом привлечения других данных по морям Чукотскому и Бофорта был сделан вывод, что в целом в постгляциальный период на указанных выше акваториях большая часть ММП (около 56,8%) уже деградировала [52]. При этом метаногидраты, образовавшиеся в ледниковый период на низменной части суши (до современной изобаты 120 м) в условиях низкого уровня Мирового океана, видимо, постепенно диссоциировали.

Исследования распространения ММП и газогидратов на мелководном (до 120 м) шельфе Арктики продолжают с привлечением дополнительных данных сейсморазведки МОГТ АО «МАГЭ» на всем арктическом шельфе. В 2023 г. авторами была завершена детализация картирования ММП для всего мелководья моря Лаптевых [53]. Авторы уверены, что результаты этих исследований приведут к существенному и даже кардинальному пересмотру традиционных картографических изображений зон существования ММП и газогидратов на всем шельфе Восточной Сибири (см. рис. 9). Это позволит значительно уточнить оценки ресурсов газогидратов, скорректировав их в меньшую сторону.

Использование результатов

Результаты исследований ИПНГ РАН были использованы в Национальном атласе Арктики, созданном в 2017 г. на основании поручений Президента РФ В.В. Путина (№ Пр-1530 от 29.06.2014 г.) и Правительства РФ (№ АХ-П9-5271 от 15.07.2014 г.) [54] и признанном в 2018 г. важнейшим достижением РАН. Кроме того, они использованы в ряде монографий, в том числе [55], и Ежегодных докладов Совета Федерации (монографических сборников), включая [56], а также в лекциях для студентов.

Заключение

Достигнутый уровень технологической оснащенности подтверждает возможность дистанционного контроля из космоса всех стадий освоения ресурсов УВ и мониторинга экологической обстановки в условиях, близких к реальному времени. Это выдвигает новые требования к полной открытости происходящих аварийных и катастрофических событий на предприятиях топливно-энергетического комплекса (ТЭК) во избежание полной потери доверия со

стороны отечественного и международного сообществ. Каждое такое событие должно быть предметом отдельного исследования (расследования) без ограничений к доступу информации для независимых экспертов. В итоге этих исследований должен быть подготовлен отчет со специальным разделом «Уроки, которые мы получили из ...», открытый для всего научно-производственного сообщества.

Решение сложных задач выявления и мониторинга развития газозрывоопасных объектов и снижения угроз жизнедеятельности человека должно оновываться на применении новых технологий детального изучения состояния геологической среды по данным ДЗЗ (из космоса и с применением БПЛА) в комплексе с высокотехнологичными наземными геофизическими исследованиями, включающими георадиолокацию, высокоразрешающую сейсморазведку 2D–4D, пассивный микросейсмомониторинг 4D и др.

При освоении ресурсов УВ на шельфе необходимо внедрение технологий сейсмического мониторинга процесса разработки месторождений (сейсморазведка 4D) в условиях, близких к реальному времени. Эти же технологии дают возможность мониторинга подводной обстановки, что повышает безопасность функционирования промыслов от возможных несанкционированных доступов (потенциальных террористических атак).

Накопление опыта и обобщение данных ДЗЗ на месторождениях позволяет выявлять типичные признаки изменения биофизических свойств поверхности, связанные с различными процессами трансформации ландшафтов, сравнить характер и масштабы нарушений, прогнозировать вероятные последствия, а также оценить эффективность проводимых мероприятий по обеспечению рационального и экологически безопасного освоения месторождений.

При проектировании и проведении бурения скважин необходимо помнить, что катастрофическая ошибка даже с одной скважиной способна причинить ущерб в десятки миллиардов долларов. В сложной современной геополитической обстановке катастрофы в Арктике не только нанесут урон экосистеме и капитализации виновных компаний, но могут привести к региональным и глобальным экологическим последствиям, вызвать серьезные репутационные потери и нанести ущерб экономике страны.

Новые технологии и технические средства на уровне Четвертой промышленной революции («Индустрия 4.0») фактически привели к революционному развитию ряда направлений развития ТЭК, включая: поднятие на высокий уровень доступности возможности выявления скрытых триггерных взаимосвязей и закономерностей природных и техногенных явлений; рост обоснованности прогнозирования трендов развития различных процессов, в том числе добычи и потребления УВ. В условиях рыночной

экономики России и других стран мира это позволяет повысить правильность принятия управленческих решений и эффективность реализации различных элементов планирования и управления развитием ТЭК, в том числе на глобальном уровне.

Благодарности

Авторы выражают признательность за многолетние поддержку и сотрудничество: РАН; РФФИ; Минобрнауки России; Правительству ЯНАО; ПАО «Газпром», включая ООО «Газпром добыча Надым», ООО «Газпром добыча Ямбург» и АО «Газпром ВНИИГаз»; ПАО «НОВАТЭК» с ООО «Ямал СПГ»; JV Vietsovpetro; НП «Российский центр освоения Арктики»; ГК «Роскосмос»; АО «МАГЭ»; АО «АКИН» АО «Концерн «Моринсис-Агат»; АО «ЦКБ МТ «Рубин»; ГЕОХИ РАН; ГК «ГЕОТЕХ»; АО «Южморгеология»; ООО «СИ Технолоджи»; РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, Московскому физико-техническому институту и БФУ имени И. Канта.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИПНГ РАН (тема «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата», № 122022800264-9).

Литература

1. *Богоявленский В. И., Богоявленский И.В.* Природные и техногенные угрозы при поиске, разведке и разработке месторождений углеводородов в Арктике // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2018. № 2. С. 60–70.
2. *Богоявленский В. И.* Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Горная промышленность. 2020. № 1. С. 97–118. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-97-118>
3. *Богоявленский В. И., Богоявленский И.В.* Специфика грязевулканической дегазации Земли с катастрофическими последствиями // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 12. С. 20–28. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-12-20-28>

4. *Аветов Н.Р., Краснова Е.А., Якушев В.С.* Некоторые особенности приустьевых газопроявлений из интервала криолитозоны на территории Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения // Газовая промышленность. 2017. № 8(756). С. 44–47.
5. *Арэ Ф.Э.* Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли. 1998. Т. 2, № 4. С. 42–50.
6. *Аковецкий В.Г.* Геоэкологические проблемы безопасности объектов нефтегазовой отрасли // Научный журнал Российского газового общества. 2021. № 4(32). С. 6–15.
7. *Баду Ю.Б.* Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи. М.: Научный мир, 2018. 232 с.
8. *Корниенко С.Г.* Характеристика антропогенных трансформаций ландшафтов в районе Бованенковского месторождения по данным спутников Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 2. С. 106–129. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-106-129>
9. *Якушев В. С.* Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009. 192 с.
10. *Ardelean F., Onaca A., Chețan M.-A. et al.* Assessment of spatio-temporal landscape changes from VHR images in three different permafrost areas in the Western Russian Arctic // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, No. 23. P. 3999. <https://doi.org/10.3390/rs12233999>
11. *Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. et al.* Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. 2019. Vol. 10. P. 264. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
12. *Kumpula T., Forbes B.C., Stammler F., Meschtyb N.* Dynamics of a coupled system: Multi-resolution remote sensing in assessing social-ecological responses during 25 years of gas field development in Arctic Russia // Remote Sensing. 2012. Vol. 4, No. 4. P. 1046–1068. <https://doi.org/10.3390/rs4041046>
13. *Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н., Никонов Р.А.* Цифровые технологии дистанционного выявления и мониторинга развития бугров пучения и кратеров катастрофических выбросов газа в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2020. № 4(40). С. 90–105. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-4-90-105>
14. *Porter C., Morin P., Howat I. et al.* ArcticDEM, Version 3 // Harvard Dataverse. 2018. 28 September. <https://doi.org/10.7910/DVN/ОННУКН>
15. *Богоявленский В.И., Сизов О.С., Никонов Р. А. и др.* Дегазация Земли в Арктике: генезис природной и антропогенной эмиссии метана // Арктика: экология и экономика. 2020. № 3 (39). С. 6–22. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-3-6-22>
16. *Ingmann P., Veihelmann B., Langen J. et al.* Requirements for the GMES Atmosphere Service and ESA's implementation concept: Sentinels-4/-5 and-5p // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 120. P. 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.023>
17. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al.* New catastrophic gas blowout and giant crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the expedition and data processing // Geosciences (Switzerland). 2021. Vol. 11, No. 2. P. 71. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020071>
18. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al.* Permanent gas emission from the Seyakha Crater of gas blowout, Yamal Peninsula, Russian Arctic // Energies. 2021. Vol. 14, No. 17. P. 5345. <https://doi.org/10.3390/en14175345>
19. Руководство пользователя Agisoft Metashape Professional Edition, версия 1.6. СПб.: Agisoft, 2020. 177 с. https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_ru.pdf (Дата обращения 30.10.2023).
20. *Kornienko S.G.* Radiometric normalization of Landsat thermal imagery for detection of tundra land cover changes: experience from West Siberia // International Journal of Remote Sensing. 2021. Vol. 42, No. 4. P. 1420–1449. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1832280>

21. Угольников Ю.С. Силикатный тампонажный материал как альтернатива традиционному портландцементу для цементирования скважин на территории континентального шельфа // Труды 13-й Международной конференции и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO / CIS Offshore 2017). СПб.: Химиздат, 2017. С. 66–167.
22. Богоявленский В.И., Перекалин С.О., Бойчук В.М. и др. Катастрофа на Кумжинском газоконденсатном месторождении: причины, результаты, пути устранения последствий // Арктика: экология и экономика. 2017. № 1(25). С.32–46. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-1-32-46>
23. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. Грязевулканическая катастрофа в Индонезии // Бурение и нефть. 2017. № 11. С. 18–27.
24. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В. Проблемы газовой отрасли Нидерландов: рекордный рост сейсмической активности на месторождении Гронинген // Газовая промышленность. 2018. № 4(767). С.124–133.
25. Богоявленский В.И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов // Научные труды Вольного экономического общества России. Т. 182. С. 12–175.
26. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В. Анализ состояния, перспектив и проблем освоения ресурсов углеводородов и угля в Арктике в связи с экономическими, геополитическими и технологическими реалиями // Научные труды Вольного экономического общества России. 2021. Т. 228. С.154–180. <https://doi.org/10.38197/2072-2060-2021-228-2-154-180>
27. Богоявленский В.И. Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11, № 1. С. 51–66. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-1-51-66>
28. Материалы общего собрания членов Российской академии наук 20 апреля 2021 года. М.: РАН, 2021. 640 с.
29. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2021. 864 с.
30. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования выбросов газа на термокарстовых озерах // Арктика: экология и экономика. 2019. № 2(34). С. 31–47.
31. Grosse G., Jones B.M. Spatial distribution of pingos in northern Asia // The Cryosphere. 2011. Vol. 5, No. 1. P. 13–33. <https://doi.org/10.5194/tc-5-13-2011>
32. Баду Ю.Б., Никитин К.А. Бугры пучения на площади газоносных структур севера Западной Сибири // Криосфера Земли. 2020. Т. 24, № 6. С. 21–32. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-6\(21-32\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-6(21-32))
33. Богоявленский В.И., Сизов О.С., Никонов Р.А., Богоявленский И.В. Мониторинг изменений концентрации метана в атмосфере Арктики в 2019–2021 годах по данным спектрометра TROPOMI // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12, № 3. С. 304–319. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-3-304-319>
34. Богоявленский В.И. Новые данные о грязевом вулканизме в Арктике на полуострове Ямал // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 512, № 1. С. 92–99. <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>
35. Богоявленский В.И., Никонов Р.А., Богоявленский И.В. Новые данные об интенсивной дегазации Земли в Арктике на севере Западной Сибири: термокарстовые озера с кратерами выбросов газа и грязевыми вулканами // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13, № 3. С. 353–368. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>

36. *Jackson R.B., Sauniois M., Bousquet P. et al.* Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources // *Environmental Research Letters*. 2020. Vol. 15, No. 7. P. 071002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2>

37. *Judd A.G., Hovland M., Dimitrov L.I. et al.* The geological methane budget at continental margins and its influence on climate change // *Geofluids*. 2002. Vol. 2, No. 2. P. 109–126. <https://doi.org/10.1046/j.1468-8123.2002.00027.x>

38. СТО Газпром 2-3.1-439-2010. Методика проведения космического мониторинга состояния территорий горных отводов для обеспечения промышленной безопасности при добыче и хранении нефти и газа. М.: Газпром экспо, 2010. 40 с.

39. *Корниенко С.Г.* Характеристика антропогенных трансформаций напочвенного покрова в районе Ямбургского месторождения по данным спутников Landsat // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20, № 2. С. 184–201. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-184-201>

40. *Московченко Д.В., Арефьев С.П., Глазунов В.А., Тугеев А.А.* Изменение состояния растительности и геокриологических условий Тазовского полуострова (восточная часть) за период 1988–2016 гг. // *Криосфера Земли*. 2017. Т. 21, № 6. С. 3–13. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6\(3-13\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6(3-13))

41. *Корниенко С.Г.* Изучение динамики термокарстовых озер в районе Ямбургского месторождения по данным спутников Landsat // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20, № 5. С. 246–260. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-5-246-260>

42. *Корниенко С.Г.* Опыт использования снимков со спутников Landsat для характеристики трансформаций напочвенного покрова на участке «Бованенково – Байдарацкая Губа» трассы магистрального газопровода «Бованенково–Ухта» // *Актуальные проблемы нефти и газа*. 2022. Вып. 4(39). С. 126–147. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-39.art10>

43. *Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Богоявленская О.В., Никонов Р.А.* Перспективы нефтегазоносности седиментационных бассейнов и фундамента Циркумарктического региона // *Геология нефти и газа*. 2017. № 5. С. 5–20.

44. *Богоявленский В.И., Керимов В.Ю., Ольховская О.О.* Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Охотское море // *Нефтяное хозяйство*. 2016. № 6. С. 43–47.

45. *Богоявленский В.И., Янчевская А.С., Богоявленский И.В., Кишанков А.В.* Газовые гидраты на акваториях Циркумарктического региона // *Арктика: экология и экономика*. 2018. № 3(31). С. 42–55.

46. *Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlensky I.* Forecast of gas hydrates distribution zones in the Arctic Ocean and adjacent offshore areas // *Geosciences (Switzerland)*. 2018. Vol. 8, No. 12. P. 453. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120453>

47. *Богоявленский В.И., Дзюбло А.Д., Иванов А.Н. и др.* Нефтегазоносность кристаллического фундамента шельфа Вьетнама: Белый Тигр и Дракон // *Геология нефти и газа*. 2016. № 5. С. 102–116.

48. Доклад о важнейших научных достижениях российских ученых в 2018 году. М.: Российская академия наук, 2019. 482 с.

49. *Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г., Казанин Г.А.* Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Восточно-Сибирское море // *Арктика: экология и экономика*. 2022. Т. 12, № 2. С. 158–171. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-2-158-171>

50. *Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г.* Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500, № 1. С. 70–76. <https://doi.org/10.31857/S2686739721090048>

51. *Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A., Kazanin G.* Distribution of permafrost and gas hydrates in relation to intensive gas emission in the central part of the Laptev Sea (Russian Arctic) // Marine and Petroleum Geology. 2022. Vol. 138. P. 105527. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105527>

52. *Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A.* Evidence of wide-scale absence of frozen ground and gas hydrates in the northern part of the East Siberian Arctic Shelf (Laptev and East Siberian seas) // Marine and Petroleum Geology. 2023. Vol. 148. P. 106050. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.106050>

53. *Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г.* Распространение субаквальной мерзлоты в море Лаптевых по данным сейсморазведки методом преломленных волн // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13, № 4. С. 501–515. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-4-501-515>

54. Национальный атлас Арктики. М.: Роскартография, 2017. 496 с.

55. *Сенин Б.В., Керимов В.Ю., Богоявленский В.И.* и др. Нефтегазоносные провинции морей России и сопредельных стран: В 4 кн. Кн. 3. История освоения и общая характеристика морской периферии России. Нефтегазоносные провинции морей Восточной Арктики и Дальнего Востока. М.: Недра, 2022. 339 с.

56. Актуальные вопросы социально-экономического развития Дальнего Востока и Арктики. Ежегодный доклад (монографический сборник) за 2021–2022 годы. Совет по вопросам развития Дальнего Востока, Арктики и Антарктики при Совете Федерации / Под ред. В.И. Богоявленского, Г.В. Иванова, Б.П. Ивченко, В.М. Грузинова. М.: Издание Совета Федерации, 2023. 328 с.

Информация об авторах

Василий Игоревич Богоявленский – член-корреспондент РАН, д.т.н., заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, geo.ecology17@gmail.com

Игорь Васильевич Богоявленский – научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, igorbogoyavlenskiy@gmail.com

Алексей Владимирович Кишанков – научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, alexey137k@yandex.ru

Сергей Гельевич Корниенко – к.т.н., заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, sracesakm2@ogri.ru

Роман Александрович Никонов – научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, nikonovroman@gmail.com

Олег Сергеевич Сизов – к.г.н., старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия, kabanin@yandex.ru

Статья поступила 25.07.2023

Increasing the efficiency and environmental safety of the development of oil and gas resources in the Arctic and Subarctic zones of the Earth in a changing climate

V.I. Bogoyavlensky*, I.V. Bogoyavlensky, A.V. Kishankov, S.G. Kornienko**, R.A. Nikonov, O.S. Sizov
Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: *geo.ecology17@gmail.com, **spaceakm2@ogri.ru

Abstract. The article presents the results of scientific research by Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences in five directions: technogenic degassing during the development of hydrocarbon deposits; natural explosive degassing; remote sensing and monitoring of methane concentration in the atmosphere; analysis of anthropogenic transformations of cryogenic landscapes; analysis of the distribution of unconventional hydrocarbon resources in the offshore areas of the Russian Arctic and Far East and adjacent foreign offshore areas. New methods and technologies were developed for the field development monitoring – real-time 4D seismic surveying. High efficiency of the data obtained by the Earth remote sensing from space and with the use of unmanned flying vehicles for monitoring of landscape changes, including the formation of giant craters, and controlling the concentration of methane in the atmosphere is shown.

Keywords: Arctic, anthropogenic impact, heaving mounds, gas hydrates, degassing of the Earth, remote sensing of the Earth (RS), gas blowout craters, cryolithozone, dangerous geocryological processes, tundra landscape

Citation: Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kishankov A.V., Kornienko S.G., Nikonov R.A., Sizov O.S. Increasing the efficiency and environmental safety of the development of oil and gas resources in the Arctic and Subarctic zones of the Earth in a changing climate // Actual Problems of Oil and Gas. 2023. Iss. 3(42). P. 235–263. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-42.art15> (In Russ.).

References

1. Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V. Natural and technogenic threats in prospecting, exploration and development of hydrocarbon fields in the Arctic // Mineral Resources of Russia. Economics and Management. 2018. No. 2. P. 60–70. (In Russ.).
2. Bogoyavlensky V.I. Natural and technogenic threats in fossil fuels production in the Earth cryolithosphere // Gornaya Promyshlennost. 2020. No. 1. P. 97–118. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-97-118> (In Russ.).
3. Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V. Specificity of mud volcanic degassing of the Earth with catastrophic consequences // Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti. 2022. No. 12. P. 20–28. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-12-20-28> (In Russ.).
4. Avetov N.R., Krasnova E.A., Yakushev V.S. Certain peculiarities of wellhead gas shows from the interval of the cryolithozone in the territory of the Yamburg oil and gas condensate field // Gazovaya Promyshlennost. 2017. No. 8. P. 44–47. (In Russ.).
5. Are F.E. The problem of hydrogen gas emission in the atmosphere // Kriosfera Zemli. 1998. Vol. 2, No. 4. P. 42–50. (In Russ.).
6. Akovetsky V.G. Geocological problems of safety of facilities of the oil and gas industry // Scientific Journal of the Russian Gas Society. 2021. No. 4(32). P. 6–15. (In Russ.).

7. *Badu Yu.B.* Cryogenic stratum of gas-bearing structures of Yamal. On the influence of gas deposits on the formation and development of a cryogenic stratum. Moscow. Nauchnyi Mir, 2018. 232 p. (In Russ.).
8. *Kornienko S.G.* Characteristics of anthropogenic transformations of landscapes in the area of Bovanenkovo gas field based on Landsat satellite data // *Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2022. Vol. 19, No. 2. P. 106–129. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-106-129> (In Russ.).
9. *Yakushev V.S.* Natural gas and hydrates in cryolithozone. Moscow: VNIIGAZ, 2009. 192 p. (In Russ.).
10. *Ardelean F., Onaca A., Cheţan M.-A.* et al. Assessment of spatio-temporal landscape changes from VHR images in three different permafrost areas in the Western Russian Arctic // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 23. P. 3999. <https://doi.org/10.3390/rs12233999>
11. *Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J.* et al. Permafrost is warming at a global scale // *Nature Communications*. 2019. Vol. 10. P. 264. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
12. *Kumpula T., Forbes B.C., Stammler F., Meschtyb N.* Dynamics of a coupled system: Multi-resolution remote sensing in assessing social-ecological responses during 25 years of gas field development in Arctic Russia // *Remote Sensing*. 2012. Vol. 4, No. 4. P. 1046–1068. <https://doi.org/10.3390/rs4041046>
13. *Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kargina T.N., Nikonov R.A.* Digital technologies for remote detection and monitoring of the development of heaving mounds and craters of catastrophic gas blowouts in the Arctic // *Arktika: Ekologiya i Ekonomika*. 2020. No. 4(40). P. 90–105. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-4-90-105> (In Russ.).
14. *Porter C., Morin P., Howat I.* et al. ArcticDEM. Version 3 // Harvard Dataverse. 2018. 28 September. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>
15. *Bogoyavlensky V.I., Sizov O. S., Nikonov R.A.* et al. Earth degassing in the Arctic: the genesis of natural and anthropogenic methane emissions // *Arktika: Ekologiya i Ekonomika*. 2020. No. 3(39). P. 6–22. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-3-6-22> (In Russ.).
16. *Ingmann P., Veihelmann B., Langen J.* et al. Requirements for the GMES Atmosphere Service and ESA's implementation concept: Sentinels-4/-5 and-5p // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.023>
17. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R.* et al. New catastrophic gas blowout and giant crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the expedition and data processing // *Geosciences (Switzerland)*. 2021. Vol. 11, No. 2. P. 71. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020071>
18. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R.* et al. Permanent gas emission from the Seyakha Crater of gas blowout, Yamal Peninsula, Russian Arctic // *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 17. P. 5345. <https://doi.org/10.3390/en14175345>
19. Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.6. St. Petersburg: Agisoft, 2020. 177 p. https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf (Accessed on 30.10.2023).
20. *Kornienko S. G.* Radiometric normalization of Landsat thermal imagery for detection of tundra land cover changes: experience from West Siberia // *International Journal of Remote Sensing*. 2021. Vol. 42, No. 4. P. 1420–1449. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1832280>.
21. *Ugol'nikov Yu.S.* Silicate backfill material as alternative to the traditional Portlandcement for well cementation in the territory of the continental shelf // *Proceedings of the 13th International*

Conference and Exhibition for Oil and Gas Resources Development of the Russian Arctic and CIS Continental Shelf (RAO/CIS Offshore 2017). St. Petersburg: Khimizdat, 2017. P. 166–167. (In Russ.).

22. *Bogoyavlensky V.I., Perekalin S.O., Boichuk V.M. et al.* Kumzhinskoye Gas Condensate Field Disaster: reasons, results and ways of eliminating the consequences // *Arktika: Ekologiya i Ekonomika*. 2017. No. 1(25). P. 32–46. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-1-32-46> (In Russ.).

23. *Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kargina T.N.* Mud volcanic catastrophe in Indonesia // *Burenie i Neft'*. 2017. No. 11. P. 2–11. (In Russ.).

24. *Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I.V.* Problems of the Netherlands gas production: Record-breaking seismic activity at the Groningen field // *Gazovaya Promyshlennost*. 2018. No. 4(767). P. 124–133. (In Russ.).

25. *Bogoyavlensky V.I.* Arctic and the World Ocean: Current state, perspectives and challenges of hydrocarbon production // *Scientific Works of the Free Economic Society of Russia*. 2014. Vol. 182, No. 3. P. 12–175. (In Russ.).

26. *Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V.* Analysis of the state, prospects and problems of the development of hydrocarbon and coal resources in the Arctic in connection with the economic, geopolitical and technological realities // *Scientific Works of the Free Economic Society of Russia*. 2021. Vol. 28. P.154–180. <https://doi.org/10.38197/2072-2060-2021-228-2-154-180> (In Russ.).

27. *Bogoyavlensky V.I.* Fundamental aspects of the catastrophic gas blowout genesis and the formation of giant craters in the Arctic // *Arktika: Ekologiya i Ekonomika*. 2021. Vol. 11, No. 1. P. 51–66. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-1-51-66> (In Russ.).

28. Materials of the general meeting of members of the Russian Academy of Sciences 20 of April 2021. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2021. 640 p. (In Russ.).

29. On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020. State report. Moscow: Ministry of Natural Resources of the Russian Federation: Lomonosov Moscow State University, 2021. 864 p. (In Russ.).

30. *Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kargina T.N., Nikonov R.A., Sizov O. S.* Earth degassing in the Arctic: Remote and field studies of the thermokarst lakes gas eruption // *Arktika: Ekologiya i Ekonomika*. 2019. No. 2(34). P. 31–47. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-2-31-47> (In Russ.).

31. *Grosse G., Jones B.M.* Spatial distribution of pingos in northern Asia // *The Cryosphere*. 2011. Vol. 5, No. 1. P. 13–33. <https://doi.org/10.5194/tc-5-13-2011>

32. *Badu Yu.B., Nikitin K.A.* Heaving mounds in the area of gas-bearing structures in the north of Western Siberia // *Kriosfera Zemli*. 2020. Vol. 24, No. 6. P. 21–32. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-6\(21-32\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-6(21-32)) (In Russ.).

33. *Bogoyavlensky V.I., Sizov O.S., Nikonov R.A., Bogoyavlensky I.V.* Monitoring of the methane concentration changes in the Arctic atmosphere in 2019–2021 according to the TROPOMI spectrometer data // *Arktika: Ekologiya i Ekonomika*. 2022. Vol. 12, No. 3. P. 304–319. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-3-304-319> (In Russ.).

34. *Bogoyavlensky V.I.* New data on mud volcanism in the Arctic on the Yamal Peninsula // *Doklady Earth Sciences*. 2023. Vol. 512, No. 1. P. 847–853. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23601116>

35. *Bogoyavlensky V.I., Nikonov R.A., Bogoyavlensky I.V.* New data on intensive Earth degassing in the Arctic in the north of Western Siberia: Thermokarst lakes with gas blowout craters and

mud volcanoes // *Arktika: Ekologiya i Ekonomika*. 2023. Vol. 13. No. 3. P. 353–368. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368> (In Russ.).

36. *Jackson R.B., Sauniois M., Bousquet P.* et al. Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources // *Environmental Research Letters*. 2020. Vol. 15, No. 7. P. 071002.

37. *Judd A.G., Hovland M., Dimitrov L.I.* et al. The geological methane budget at continental margins and its influence on climate change // *Geofluids*. 2002. Vol. 2, No. 2. P. 109–126. <https://doi.org/10.1046/j.1468-8123.2002.00027.x37>

38. STO Gazprom 2-3.1-439-2010. Methodology for conducting space monitoring of the state of the territories of mining allotments to ensure industrial safety in the production and storage of oil and gas. Moscow: Gazprom Ekspo, 2010. 40 p. (In Russ.).

39. *Kornienko S.G.* Characteristics of anthropogenic transformations of the ground cover in the area of Yamburg gas field based on Landsat satellite data // *Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2023. Vol. 20, No. 2. P. 184–201. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-184-201> (In Russ.).

40. *Moskovchenko D.V., Arefiev S.P., Glazunov V.A., Tigeev A.A.* Changes in vegetation and geocryological conditions of the Taz Peninsula (eastern part) for the period of 1988–2016 // *Kriosfera Zemli*. 2017. Vol. 21, No. 6. P. 3–13. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6\(3-13\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6(3-13)) (In Russ.).

41. *Kornienko S.G.* Studying the dynamics of thermokarst lakes in the area of the Yamburg gas field using Landsat satellite data // *Sovremennye Problemy Distsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2023. Vol. 20, No. 5. P. 246–260. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-5-246-260> (In Russ.).

42. *Kornienko S.G.* Using images from Landsat satellites to characterize the transformations of the ground cover at the Bovanenkovo–Baydaratskaya Bay section of the route of the Bovanenkovo–Ukhta gas pipeline // *Actual Problems of Oil and Gas*. 2022. Iss. 4(39). P. 126–147. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-39.art10> (In Russ.).

43. *Bogoyavlenskiy V.I., Bogoyavlenskiy I.V., Bogoyavlenskaya O.V., Nikonov R.A.* Prospects of oil and gas content of sedimentary basins and the basement of the Circumarctic region // *Geologiya Nefti i Gaza*. 2017. No. 5. P. 5–20. (In Russ.).

44. *Bogoyavlenskiy V.I., Kerimov V.Yu., Olkhovskaya O.O.* Dangerous gas-saturated objects in the world ocean: The Sea of Okhotsk // *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*. 2016. No. 6. P. 43–47. (In Russ.).

45. *Bogoyavlenskiy V.I., Yanchevskaya A. S., Bogoyavlenskiy I.V., Kishankov A. V.* Gas hydrates on the Circum-Arctic Region aquatories // *Arktika: Ekologiya i Ekonomika*. 2018. No. 3(31). P. 42–55. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-3-42-55> (In Russ.).

46. *Bogoyavlenskiy V., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlenskiy I.* Forecast of gas hydrates distribution zones in the Arctic Ocean and adjacent offshore areas // *Geosciences (Switzerland)*. 2018. Vol. 8, No. 12. P. 453. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120453453>

47. *Bogoyavlenskiy V.I., Dzyublo A.D., Ivanov A.N.* et al. Oil and gas potential of the crystalline basement of the Vietnam Shelf: White Tiger and Dragon // *Geologiya Nefti i Gaza*. 2016. No. 5. P. 102–116. (In Russ.).

48. Report on the most important scientific achievements of Russian scientists in 2018. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2019. 482 p. (In Russ.).

49. *Bogoyavlensky V.I., Kishankov A.V., Kazanin A.G., Kazanin G.A.* Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: The East Siberian Sea // *Arktika: Ekologiya i Ekonomika*. 2022. Vol. 12, No. 2. P. 157–171. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-2-158-171> (In Russ.).

50. *Bogoyavlensky V.I., Kishankov A.V., Kazanin A.G.* Permafrost, gas hydrates and gas seeps in the central part of the Laptev Sea // *Doklady Earth Sciences*. 2021. Vol. 500, No. 1. P. 766–771. <https://doi.org/10.1134/S1028334X2109004X>

51. *Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A., Kazanin G.* Distribution of permafrost and gas hydrates in relation to intensive gas emission in the central part of the Laptev Sea (Russian Arctic) // *Marine and Petroleum Geology*. 2022. Vol. 138. P. 105527. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105527>

52. *Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A.* Evidence of wide-scale absence of frozen ground and gas hydrates in the northern part of the East Siberian Arctic Shelf (Laptev and East Siberian seas) // *Marine and Petroleum Geology*. 2023. Vol. 148. P. 106050. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.106050>

53. *Bogoyavlensky V.I., Kishankov A.V., Kazanin A.G.* Distribution of subsea permafrost (frozen ground) in the Laptev Sea based on seismic refraction data // *Arktika: Ekologiya i Ekonomika*. 2023. Vol. 13, No. 4. P. 501–515. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-4-501-515> (In Russ.).

54. National atlas of the Arctic. Moscow. Roskartografiya, 2017. 496 p. (In Russ.).

55. *Senin B.V., Kerimov V.Yu., Bogoyavlensky V.I.* et al. Oil and gas provinces of Russian seas and adjacent offshore areas: In 4 books. Book 3. History of development and general characteristics of the Russian maritime periphery. Oil and Gas Provinces of the Seas of the Eastern Arctic and the Far East. Moscow: Nedra, 2022. 339 p. (In Russ.).

56. Topical issues of socio-economic development of the Far East and the Arctic. Annual Report 2021–2022 (monographic collection). Council for the Development of the Far East, the Arctic and Antarctic under the Federation Council / Ed. by V.I. Bogoyavlensky, G.V. Ivanov, B.P. Ivchenko, V.M. Gruzinov. Moscow: Federation Council, 2023. 328 p. (In Russ.).

Information about the authors

Vasily I. Bogoyavlensky – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Research, Head of Laboratory, Chief Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, geo.ecology17@gmail.com

Igor V. Bogoyavlensky – Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, igorbogoyavlenskiy@gmail.com

Alexei V. Kishankov – Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, alexey137k@yandex.ru

Sergey G. Kornienko – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, Leading Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, spaceakm2@ogri.ru

Roman A. Nikonov – Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, nikonovroman@gmail.com

Oleg S. Sizov – Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, kabanin@yandex.ru

Received 25.07.2023