

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА И НАЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РОССИИ В АРКТИКЕ

© 2024 г. В.И. Богоявленский^{a,*}, И.В. Богоявленский^{a,**}, А.В. Кишанков^{a,***}

^aИнститут проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

*E-mail: geo.ecology17@gmail.com

**E-mail: ivb@ipng.ru

***E-mail: alexey137k@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.07.2024 г.

После доработки 06.08.2024 г.

Принята к публикации 23.08.2024 г.

В статье рассмотрены достижения и проблемы геологоразведочных работ на акваториях Арктики. Авторами статьи получены принципиально новые знания о перспективах нефтегазоносности осадочного чехла и гетерогенного фундамента, а также насыщенности газом в свободном и гидратном состояниях верхней части осадочных отложений. Разработан комплекс новых технологий, включая 4D-сейсморазведку в близких к реальному времени условиях. Впервые по данным сейсморазведки методом преломлённых волн выполнено картирование распространения мёрзлых и талых пород на шельфе морей Восточной Сибири. Дано принципиально новое обоснование газодинамического генезиса образования гигантских кратеров в Арктике, подразумевающее формирование под действием эндогенных процессов газонасыщенных полостей в массивах подземного льда. По данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса на мелководном дне термокарстовых озёр и рек полуострова Ямал, а также прибрежных частей Карского моря выявлено 6022 зоны интенсивной (взрывной) дегазации с формированием кратеров (покмарок). Впервые по данным ДЗЗ из космоса на дне арктических термокарстовых озёр обнаружены крупные грязевулканические постройки с явно выраженными кратерами. Исследованы причины и последствия катастрофических техногенных выбросов и самовоспламенений газа при бурении поисково-разведочных скважин на ряде месторождений в Арктике.

Ключевые слова: Арктика, нефтегазоносность, многолетнемёрзлые породы, дегазация Земли, взрывы газа, газогидраты, катастрофы, сейсморазведка, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), БПЛА.

DOI: 10.31857/S0869587324100055, EDN: ERVSFE

Современное состояние, перспективы и проблемы нефтегазовой сейсморазведки. Сейсморазведка служит основным геофизическим методом изучения геологического строения Земли и поиска месторождений

(залежей) углеводородов, применяемым и активно развиваемым свыше 100 лет. На протяжении последних семи десятилетий проводятся региональные исследования методом глубинного сейсмического зон-



БОГОЯВЛЕНСКИЙ Василий Игоревич — член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией комплексного геолого-геофизического изучения и освоения нефтегазовых ресурсов континентального шельфа ИПНГ РАН. **БОГОЯВЛЕНСКИЙ** Игорь Васильевич — научный сотрудник ИПНГ РАН. **КИШАНКОВ** Алексей Владимирович — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник ИПНГ РАН.

дирования, основанным на взрывном возбуждении упругих колебаний с регистрацией преломлённых и отражённых сейсмических волн [1]. Метод был разработан под руководством академика Г.А. Гамбурцева в Геофизическом институте АН СССР (в 2004 г. вошёл в состав объединённого Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН).

В современной нефтегазопроисковой сейсморазведке используются отражённые волны, регистрируемые методом общей глубинной точки (МОГТ), запатентованным в 1956 г. У. Мейном (США) [2]. МОГТ предусматривает многократное возбуждение, регистрацию и накопление упругих колебаний и позволяет успешно решать сложнейшие задачи дистанционного выявления потенциальных резервуаров углеводородов, прогнозирования их физических характеристик, типа и характера флюидонасыщения. Практическое применение этого метода первоначально базировалось на двухмерных региональных и локальных исследованиях вдоль выбранных сейсмопрофилей (2D-сейсморазведка).

Первые значительные объёмы сейсмических материалов на основе МОГТ в арктических морях России были получены Комплексной арктической геолого-геофизической экспедицией (ныне АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция») научно-производственного предприятия «Севморгео» под руководством академика И.С. Грамберга в 1970-х годах. Они позволили обосновать высокие перспективы нефтегазоносности Баренцево-Карского региона, в который уходят северные завершения Тимано-Печорского и Западно-Сибирского нефтегазовых бассейнов, и выявить около 40 перспективных структур. На основе этих данных в 1980-х годах были развёрнуты масштабные геолого-геофизические работы силами Всесоюзного морского научно-производственного объединения по геофизическим поискам и разведке месторождений нефти и газа (ВМНПО «Союзморгео»), созданного в 1979 г. на базе Главного управления разведки и разработки морских месторождений нефти и газа «Главморнефтегаз» Министерства газовой промышленности СССР.

В постсоветские годы большой вклад в проведение геолого-геофизических работ на шельфе Арктики внесли АО «МАГЭ» и АО «СМНГ», финансируемые ПАО «Газпром», ПАО «НК «Роснефть» и из госбюджета. Однако уровень изученности (плотность 2D-сейсморазведки) арктического шельфа России к настоящему времени существенно ниже, чем в акваториях Норвегии, Канады и США (рис. 1) [3–7]. По данным «ВНИИОкеангеология», средняя плотность изученности морей Арктики 2D-сейсморазведкой ($\text{км}/\text{км}^2$) по состоянию на начало 2023 г. неравномерна: Баренцево и Печорское моря – 0.54, Карское – 0.26, Лаптевых – 0.17, Восточно-Сибирское – 0.08, Чукотское – 0.13. В первых трёх морях проведён большой объём 3D-сейсморазведки.

В изучение геологического строения и перспектив нефтегазоносности Циркумарктического мегарегиона большой вклад внесли академики РАН И.С. Грамберг, А.Э. Конторович, Н.П. Лавёров, В.Е. Хаин, Е.В. Артюшков, В.А. Верниковский, А.Н. Дмитриевский, В.Д. Каминский, М.А. Федонкин, доктора геолого-минералогических наук Я.П. Маловицкий, В.П. Гаврилов, Б.В. Сенин, О.И. Супруненко, Э.В. Шипилов и др. Значительный объём исследований выполнен учёными ИПНГ РАН [3–8].

В итоге проводившихся с 1983 по 2023 г. геолого-разведочных работ на шельфе Баренцево-Карского региона пробурены 106 морских поисково-разведочных скважин. При этом был открыт ряд уникальных и крупных по запасам углеводородов месторождений, а также обоснованы перспективы нефтегазоносности морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского. На шельфе Баренцева и Печорского морей открыто 12 месторождений (в их числе 2 уникальных и 7 крупных), на шельфе Карского моря с Обской и Тазовской губами – 20 месторождений углеводородов (13 уникальных и 6 крупных). Ещё одно крупное месторождение, Центрально-Ольгинское, открыто с помощью наклонной скважины, пробуренной с бе-

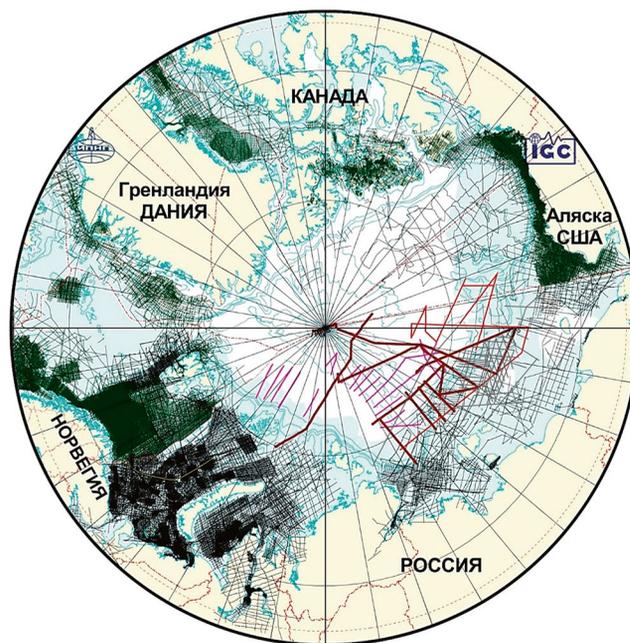


Рис. 1. Изученность акваторий Циркумарктического мегарегиона 2D-сейсморазведкой на основе метода общей глубинной точки

Примечание: российские сейсмопрофили обозначены чёрным цветом, лиловым, красным и бордовым – используемые для обоснования внешней границы российского континентального шельфа; зарубежные сейсмопрофили выделены тёмно-зелёным цветом. Полноцветная версия рисунка 1 и последующихடுத்துна в электронной версии журнала

рега Хатангского залива моря Лаптевых. При этом из 33 месторождений только на трёх ведётся добыча: Приразломное (с 2013 г.) в Печорском море, Юрхаровское (с 2003 г.) и Семаковское (с 2022 г.) в Тазовской губе. В Восточно-Сибирском и Чукотском морях нефтегазопроисловое бурение не проводилось.

Более 10 лет назад мы неоднократно отмечали, что первоочередные месторождения для организации морских нефтегазовых промыслов в условиях сложной ледовой обстановки Арктики рациональнее выбирать вблизи побережья с широко развитой инфраструктурой. При этом особый интерес представляют залежи, которые можно разрабатывать горизонтальными скважинами с берега [5–7]. Это положение базируется на мировом опыте освоения морских ресурсов углеводородов с учётом, что рекордная по длине ствола скважина (15 000 м) с горизонтальным окончанием была пробурена в 2017 г. с морской ледостойкой платформы “Орлан” на сахалинском месторождении Чайво в Охотском море. Её отход от вертикали составил 14 129 м. Подобными скважинами, пробуренными с берега, осваиваются упоминавшиеся Юрхаровское и Семаковское месторождения.

К сожалению, большая часть огромных по площади лицензионных участков в Арктике, полученных в 2009–2014 гг. ведущими отечественными компаниями ПАО «НК «Роснефть»» и ПАО «Газпром», расположена на больших удалениях от берега (от 100 до 1400 км) в экстремальных ледовых условиях, для которых в мире ещё не созданы безопасные технологии нефтегазодобычи. В настоящее время можно констатировать, что лицензионные обязательства по бурению морских скважин большей частью не выполнены, а планы по развёртыванию ширококомасштабной добычи углеводородов на шельфе Арктики к 2030 г. не будут реализованы.

При организации геологоразведочных работ на шельфе Арктики необходимо учитывать большую продолжительность периодов поиска и освоения месторождений. В выборке из 32 морских месторождений углеводородов России и других стран фактическое среднее время начала добычи со дня открытия составило более 25 лет, а по арктическим месторождениям России – свыше 35 лет. Поэтому можно говорить, что работы на шельфе Арктики проводятся на дальнюю перспективу, а открытые месторождения представляют собой стратегический резерв нашей страны. Необходимость государственной поддержки геологоразведочных работ на шельфе Арктики определена потребностью обеспечения национальной безопасности России, для которой требуется “развитие Арктической зоны Российской Федерации как стратегической ресурсной базы и её рациональное использование, включая полномасштабное освоение континентального шельфа” [9, п. 13].

Многомерная сейсморазведка. В последние десятилетия поисково-разведочное бурение обычно

осуществляется после трёхмерной (3D) сейсморазведки, повышающей надёжность обнаружения и изучения залежей углеводородов. При этом морская 3D-сейсморазведка проводится с плавающими косами (обычно от 4 до 24) или с донными станциями (например, отечественный донный комплекс “Краб” АО “МАГЭ” [10]). Применение 3D-сейсморазведки значительно повышает эффективность освоения месторождений за счёт более детального изучения геологического разреза, получения данных об анизотропных свойствах среды для прогноза ориентации систем субвертикальных трещин и фильтрационно-ёмкостных свойств резервуаров (залежей) углеводородов [8].

За рубежом для повышения эффективности разработки морских нефтегазовых месторождений после первого эксперимента 1982–1983 гг. в Техасе всё чаще стал применяться мониторинг процесса флюидозамещения в резервуарах с помощью четырёхмерной (4D) сейсморазведки [11]. Её суть сводится к периодическому (обычно с интервалом в несколько лет) проведению дополнительной 3D-сейсморазведки, при этом при обработке полученных материалов осуществляется разностное сравнение первоначальных и новых данных 3D. Очевидно, что 4D-сейсморазведка – наиболее сложный, трудоёмкий и дорогой метод анализа огромных объёмов информации на базе мощных стационарных вычислительных центров. Однако на фоне повышения коэффициента извлечения нефти в 2 раза и более (свыше 60%) эти затраты мизерны.

В России 4D-сейсморазведка имеет пока очень ограниченное применение. Впервые её осуществила компания “PGS” по заказу “Сахалин Энерджи” на месторождениях Пильтун-Астохское (2010 г.) и Лунское (2018 г.) [12]. В том же 2018 г. “МАГЭ” провела повторные работы 3D с донными станциями на Приразломном месторождении. Таким образом, отечественная нефтегазовая отрасль заметно отстаёт в мониторинге резервуаров, что обусловлено техническими и организационными сложностями, а в некоторой степени и консерватизмом мышления.

Однако в области 4D-сейсморазведки существует возможность “импортоопережения” – кардинального прорыва геофизической отрасли России с целью повышения эффективности и экологической безопасности освоения месторождений углеводородов [12]. Авторами статьи разработан комплекс технологий, базирующийся на различных геофизических принципах, в том числе 4D-сейсморазведка в условиях реального времени (патенты РФ 2539745, 2540005, 2544948, 2579089, 2602735, 2621638, 2691630, 2761052). Комплекс позволяет не только контролировать изменения в залежах углеводородов, но и оперативно выявлять флюидоперетоки в околоскважинном пространстве, угрожающие аварийными и катастрофическими ситуациями (см. ниже). Часть этих разработок выполнена совместно

с ПАО «Газпром» и ООО «Газпром добыча Ямбург», АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «Концерн «Моринсис-Агат»» и АО «ЦКБ МТ «Рубин»» [12, с. 470–479]. Это вселяет надежду на их внедрение, в том числе на месторождении Каменномысское-море на строящейся морской ледостойкой платформе. Большая часть наших разработок относится к приоритетному направлению научно-технологического развития в части «Сохранение и рациональное использование природных ресурсов» и входит в перечень «Критических технологий», направленных на «мониторинг и прогнозирование состояния окружающей среды... предупреждение и снижение рисков чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [13, п. 7, 19, 20].

Разработанные технологии ориентированы на своевременное выявление и мониторинг опасных природных и природно-техногенных залежей газа, в первую очередь метана, и жидких углеводородов в верхней части разреза (глубины до 500–900 м) — это одна из важнейших проблем обеспечения безопасности 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, нанесён огромный урон нефтегазовым промыслам, экосистеме и экономике нефтегазодобывающих стран [6, 7]. К началу 2020 г. прямые финансовые потери компании «BP» и её партнёров «Transocean» и «Halliburton» из-за штрафов и ликвидации работ после катастрофы 2010 г. в Мексиканском заливе превысили 71 млрд долл.

Основные проблемы современной морской сейсморазведки. После трагического развала СССР морской геофизический флот России оказался в крайне сложной ситуации. Производимое в СССР сейсмическое оборудование не могло конкурировать с зарубежным, а финансовые средства на переоснащение геофизических предприятий не выделялись. Тем не менее благодаря активности руководства основных геофизических компаний страны «СМНГ», «ДМНГ» и «МАГЭ», подкреплённой финансовой помощью государственного газового концерна «Газпром» (ныне ПАО «Газпром»), флот был не только сохранён, но и оснащён по западным стандартам. Отметим, что научно-исследовательские суда АН СССР/РАН никогда не имели сейсморазведочного оборудования, подобного используемому в геофизическом флоте СССР/России.

Переоснащение геофизического флота в первой половине 1990-х годов позволило продолжить исследования отечественного шельфа в период навигации и даже получать работу в зимнее время в других странах, несмотря на жёсткую конкуренцию. В 1993–2014 гг. объёмы работ лидера отечественной сейсморазведки «СМНГ» на российский шельфе составляли лишь 9–30% выполняемых им годовых объёмов, что объясняется коротким сезоном работ в летне-осеннее время (2–3 месяца)

и нехваткой заказов, финансируемых из госбюджета и недропользователями.

В 2020 г. российский геофизический флот состоял из 14 судов, полностью оснащённых современными техническими средствами зарубежного производства, включая пять судов для проведения 3D/4D-сейсморазведки, из которых три современных судна («Академик Примаков»/Western Neptune СМНГ «Росгео», «Вячеслав Тихонов»/Polarcus Selma и «Иван Губкин»/Polarcus Amani ПАО «Совкомфлот») способны работать с 8–14 сейсмодосками.

К середине 2024 г. около половины из 14 судов были безвозвратно утеряны или находятся в критическом техническом состоянии. Из-за действия санкций резко обострились проблемы восполнения и ремонта зарубежного геофизического оборудования, а отечественные компетенции, касающиеся плавающего заборного оборудования (сейсмокося), в значительной степени утеряны. Практически единственное исключение — компания «СИ Технологии» (г. Геленджик), в которой благодаря героическим усилиям её руководства ещё сохранились специалисты и производственное оборудование.

Основная проблема сохранения российского геофизического флота — очень ограниченные объёмы финансирования работ, которые в последние годы резко сократились недропользователями и федеральным бюджетом вплоть до близкого к обнулению в 2024 г. Некоторые надежды возлагаются на предусматривающий небольшой объём стабильного финансирования геофизических исследований федеральный проект «Континентальный шельф РФ», который был подготовлен в 2023 г., но ещё не утверждён.

Согласно «Морской доктрине Российской Федерации» [9, п. 23.3] «несоответствие состава и состояния российского научно-исследовательского флота современным требованиям и масштабам задач, стоящих перед Российской Федерацией в сфере морских научных исследований» отнесено к угрозам национальной безопасности России.

Комплексные геофизические исследования перспектив нефтегазоносности Северного Ледовитого океана. За рубежом большое внимание давно уделяют изучению нефтегазоносности глубоких горизонтов, ведут целенаправленный поиск, открыто множество месторождений на глубинах более 5–10 км. Фундаментально важная информация получена в результате изучения палеозойских отложений (до ордовика) глубоких скважин Berta Rogers-1 (забой 9583 м) и Ralph Lowe-1 (забой 8700 м) Анадарского и Пермского бассейнов в южной части США [14, 15]. Можно считать доказанным, что глинистые сланцы палеозоя на глубинах 7–9 км сохраняют значительную способность нефтеобразования, несмотря на температуры свыше 200–230°C и антрацитовый уровень метаморфизма. Высочайший авторитет в области нефтегазовой геологии — академик

ной алгоритмической формализации комплекса закономерностей образования ряда месторождений в кристаллических фундаментах Норвежского и Южно-Китайского морей (Luno, Белый Тигр, Дракон и др.), выявленных в результате наших предшествующих исследований [4, 5, 18, 19]. Основным поисковым признаком нефтегазоносности кристаллического фундамента служит наличие его прямого контакта с нефтегазоматеринскими толщами осадочных отложений с аномально высоким пласточным давлением, что было успешно подтверждено в Южно-Китайском море в крупном Кыбулонском нефтегазовом бассейне в процессе сотрудничества с СП “Вьетсовпетро” (совместное предприятие АО “Зарубежгеология” и “PetroVietnam”) [19].

Наряду с изучением глубоких горизонтов в ИПНГ РАН проведён широкий комплекс исследований газонасыщенности верхней части разреза на акваториях морей Восточной Сибири, Чукотки и Дальнего Востока. При анализе более 45 тыс. км временных разрезов методом общей глубинной точки АО “МАГЭ”, АО “ДМНГ” и Геологической службы США (USGS) выявлены и закартированы свыше 2.3 тыс. потенциально газонасыщенных объектов [20, 21]. Они искажают характер временных разрезов МОГТ, приводят к погрешностям в глубинных построениях и представляют большую угрозу при бурении скважин.

При анализе временных разрезов МОГТ на ряде акваторий были обнаружены псевдодонные отражающие горизонты BSR (Bottom Simulating Reflector), образующиеся от подошвы потенциально газогидратонасыщенных отложений (в том числе впервые на континентальном склоне моря Лаптевых и во впадине ТИНРО в северной части Охотского моря). Эти исследования сопровождались изучением распространения потенциальных зон стабильности с благоприятными термобарическими условиями для образования и сохранения газогидратов. При этом на основе данных более 622.5 тыс. океанологических станций зондирования построены картографические схемы распределения температур воды вблизи дна на акваториях Циркумарктического мегарегиона (рис. 3а) и выявлены области с зонами стабильности газогидратов от Северного полюса до широты 45° (рис. 3б) [22]. Картирование опасных газонасыщенных объектов на акваториях Северного Ледовитого, Атлантического и Тихого океанов было признано одним из важнейших достижений РАН за 2018 г.

При подготовке морских площадей для установки нефтегазодобывающих платформ и/или строительства искусственных островов в арктических и субарктических условиях в целях безопасности производственных работ необходима информация о физическом состоянии грунтов, особенно о нали-

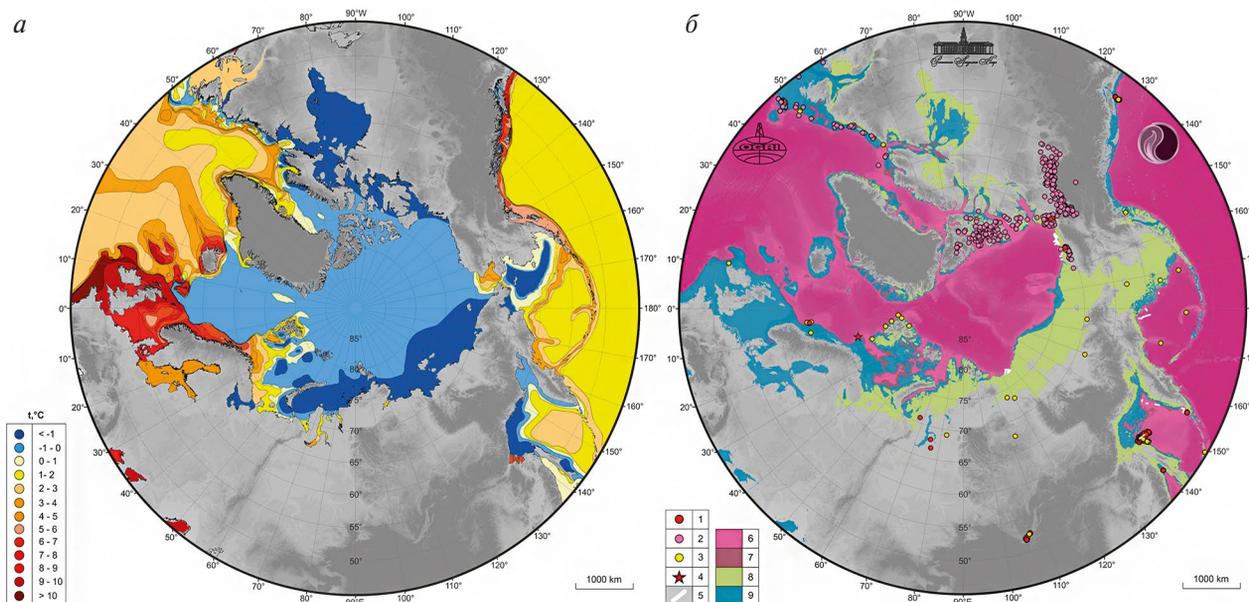


Рис. 3. Циркумарктический мегарегион: картографические схемы распределения температур воды вблизи дна (а) и прогноза зон распространения газогидратов (б) [22]

1 – газогидраты подтверждены образцами со дна и из скважин; 2 – высоковероятный прогноз присутствия 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, 8 – зоны благоприятных термобарических условий существования газогидратов вне (6 и 7) и внутри (8) границ существования потенциальных субаквальных многолетнемёрзлых пород; 9 – отсутствие условий для формирования и существования газогидратов на акваториях

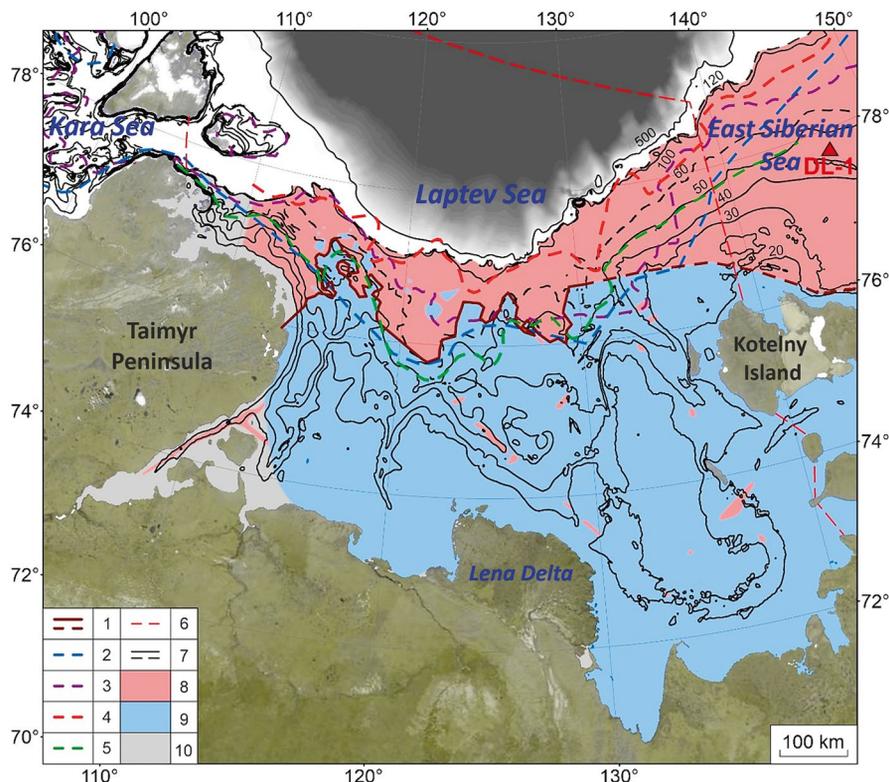


Рис. 4. Сопоставление зон распространения мёрзлых и талых пород на шельфе моря Лаптевых и западной части Восточно-Сибирского моря

Границы мёрзлых и талых пород, выделенные по данным: 1 – авторов статьи; 2 – J. Brown, O. Ferrians et al [27]; 3 – M. Angelopoulos, P. Overduin et al [28]; 4 – Н.Н. Романовского и В.Е. Гумского [29]; 5 – Т.В. Матвеевой, В.Д. Каминского и др. [30]; 6 – граница моря Лаптевых; 7 – изобаты (м); 8 – зона прогнозируемого преимущественного отсутствия ММП (талые породы); 9 – зона прогнозируемого преимущественного существования ММП; 10 – “серая зона” (недостаток информации); DL-1 скважина 2022 г.

чий или отсутствию залежей газа в свободном и/или гидратном состоянии, а также субаквальных многолетнемёрзлых пород (ММП).

Обычно для получения информации о распространении ММП необходимо проводить специальные дорогостоящие геофизические исследования (сейсмоакустика, электроразведка) и/или бурение, результаты которых не всегда однозначны. Однако такая информация может быть получена и по имеющимся материалам сейсморазведки МОГТ с применением специальных технологий обработки и анализа. Полевые многоканальные сейсмограммы, регистрируемые при проведении 2D- и 3D-сейсморазведки МОГТ, обычно содержат записи преломлённых волн, регистрируемых в первых вступлениях. При традиционной обработке материалов МОГТ преломлённые волны оказываются помехами, автоматически срезаются мьютингом¹ и отбрасываются. Специфика распространения преломлённых волн в субгоризонтальном направ-

¹ Мьютинг – принудительное обнуление начальной части трасс удалённых сейсмоприемников при цифровой обработке сейсмограмм.

лении вдоль пластов делает их уникальным инструментом анализа физических характеристик отложений. При этом многолетнемёрзлые породы служат сильным преломляющим горизонтом с высокими скоростями распространения упругих колебаний (обычно до 4.0 км/с).

В 2021–2023 гг. впервые для моря Лаптевых проведены обработка и комплексный анализ большого объёма записей первых вступлений преломлённых волн сейсмограмм общего пункта возбуждения сейсмических волн по 114 сеймопрофилям МОГТ АО “МАГЭ” общей протяжённостью более 20 тыс. км [23–26]. Получена принципиально новая информация о состоянии субаквальной криолито-зоны, при этом выявлена граница между преимущественным распространением мёрзлых (Южная зона) и талых (Северная зона) пород (рис. 4) [24–26].

Выполненное нами картирование границы распространения ММП кардинально отличается от всех других построений отечественных и зарубежных специалистов (см. рис. 4) [27–31]. При этом наши данные 2021–2022 гг. [23–25] позднее были подтверждены результатами скважины DL-1, про-

буренной ВСЕГЕИ и АО «Росгеология» при поддержке ПАО «НК «Роснефть»» [32].

В 2024 г. наши картографические схемы [23–26], включая приведенную на рис.4, были сопоставлены специалистами ПАО «НК «Роснефть» с неопубликованными данными бурения более 10 структурно-параметрических и мерзлотных скважин и получили полное подтверждение. При этом было официально признано, что «результаты исследований обладают высокой научно-практической ценностью».

В связи с получением новых знаний о распространении многолетнемерзлых пород на всём шельфе Восточной Сибири требуется пересмотр границ возможного существования криогенных газогидратов, что позволит значительно скорректировать оценки их ресурсов в меньшую сторону, а также оценку риска влияния диссоциации газогидратов на глобальные изменения климата [23–26].

Таким образом, специальные технологии обработки и интерпретации архивных материалов 2D-сейсморазведки МОГТ позволяют получать принципиально новую информацию о физическом состоянии верхней части разреза, включая наличие или отсутствие многолетнемерзлых пород и насыщения пород-коллекторов газом в свободном и/или гидратном состояниях. Это повышает достоверность структурных построений и точность прогнозирования нефтегазонасыщенности, снижает риски при бурении скважин и повышает эффективность и экологическую безопасность добычи нефти и газа.

Природная взрывная дегазация земли в Арктике. Дегазация Земли – широко распространённое естественное перманентное явление, влияющее на состав газа её атмосферы, что, в свою очередь, может приводить к изменениям климата. Процесс добычи углеводородов по физической сути следует отнести к контролируемой человеком техногенной форме дегазации недр. Однако при добыче и транспортировке углеводородов, а также из неработающих аварийных, ликвидированных и законсервированных скважин нередко происходят неконтролируемые утечки газа и жидких углеводородов, и они вносят существенный вклад в увеличение парникового эффекта, повышающего температуру нижней части атмосферы.

Влияние глобальных климатических изменений привело к ускоренным темпам потепления в Арктике, в результате чего активизируется деградация ММП, порождающая широкий спектр проблем, которые оказывают значительное влияние на жизнедеятельность человека. Среди этих проблем особо выделим ухудшение несущей способности грунтов и возможное усиление процессов дегазации Земли за счёт изменения условий стабильности газогидратов и уменьшения экранирующих свойств ММП на пути субвертикальной миграции газа. Это способствует активизации газодинамических процессов,

в том числе во взрывной форме, при мощных импульсных выбросах газа из ММП, в результате чего в Арктике образуются гигантские кратеры на суше, дне водоёмов и в прибрежных частях морей [7, 18, 33–43]. Кроме того, это приводит к увеличению эмиссии парниковых газов в атмосферу, что может активизировать дальнейшее потепление климата. В связи с изложенным подчеркнём, что наши исследования направлены на решение важнейшей проблемы снижения риска возникновения (предотвращения) возможных катастроф в Арктике прямо или косвенно связанных с природной и техногенной дегазацией Земли.

Проводимые нами исследования носят междисциплинарный характер и подразумевают сбор и комплексный анализ больших объёмов информации, на основе которого рождаются новые знания. Более 15 лет назад в ИПНГ РАН была создана геоинформационная система «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО»), которая содержит более 20 баз данных о различных опасных природных и техногенных явлениях и процессах [7, 18, 33–43]. В значительной степени они основаны на использовании данных геофизических исследований, в первую очередь 2D-сейсморазведки, дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Из данных ДЗЗ наиболее широко используются космоснимки среднего (например, Sentinel и Landsat) и высокого (Keyhole, WorldView, GeoEye, PlanetScope, Ресурс-П, Канопус-В) разрешений, а также цифровые модели рельефа местности ArcticDEM с разрешением 2 м.

В 2014 г. средства массовой информации взбудоражили мировое сообщество видео- и фотоизображениями двух гигантских кратеров в Российской Арктике, при этом циркулировали самые фантастические гипотезы их образования. В течение последующих 10 лет на севере Западной Сибири обнаружено и в разной степени изучено более 20 подобных кратеров газового выброса (рис. 5) [7, 18, 33–43]. Большинство из них расположены вблизи и/или даже непосредственно на территории уникального по запасам газа Бованенковского месторождения, а также вблизи магистрального газопровода «Бованенково–Ухта» и ямальской железной дороги «Обская–Карская» ПАО «Газпром». При взрывах разлёт крупных кусков породы достигал 300–900 м.

Во всех пяти случаях наблюдения выбросов газа (объекты С3, С11, С12, С21 и С23 в ГИС «АМО») очевидцами из коренного населения были зафиксированы его самовоспламенения, что повышает силу взрыва и его опасность для жизнедеятельности человека. При комплексных исследованиях различных событий природных и техногенных выбросов газа (включая извержения грязевых вулканов) впервые было обосновано, что одна из основных причин его самовоспламенений – электризация окружающего

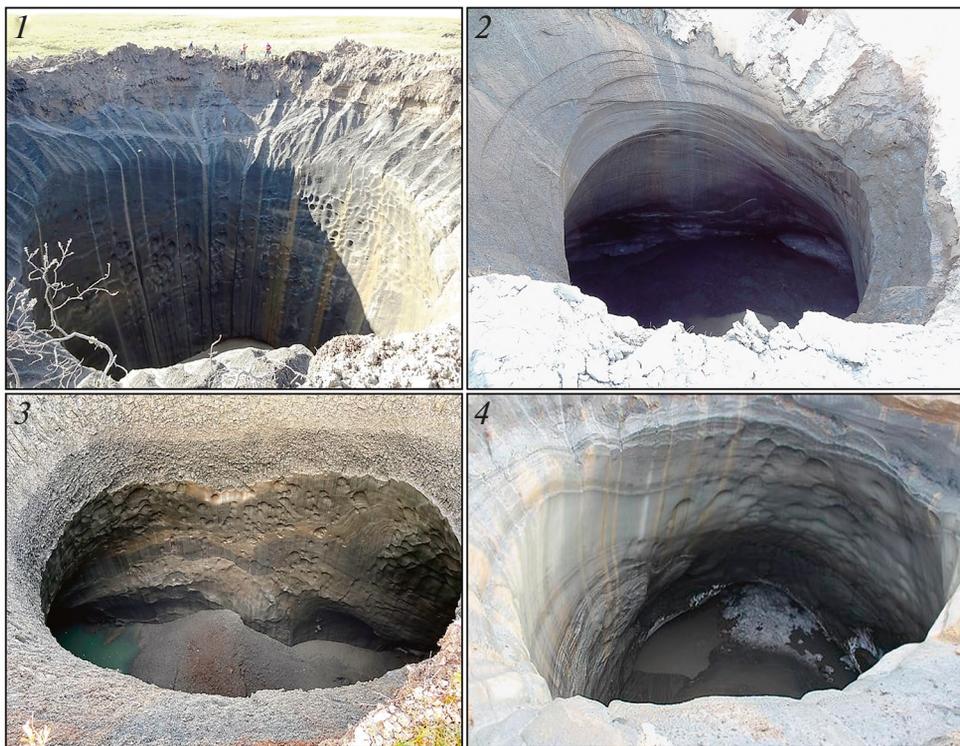


Рис. 5. Гигантские полости в массивах подземного льда, обнажившиеся после выбросов/взрывов газа на севере Западной Сибири [34]

Объекты: 1 – С1, 2 – С12, 3 – С17 на полуострове Ямал, 4 – С3 на полуострове Гыданский

пространства и электростатические разряды, возникающие при фонтанировании струи газа с неоднородными частицами в воздушной среде [33–35].

Особо важная информация при мониторинге эволюции объектов выбросов газа была получена в результате построений цифровых 3D и 4D-моделей объектов по данным ДЗЗ из космоса и с применением БПЛА. Мониторинговые исследования ряда объектов (Антипаютинский С3, Сеяхинский С11, Открытие и др.) выявили продолжающиеся газогидродинамические процессы.

Применение широкого комплекса геолого-геофизических исследований, включая георадиолокацию, эхолотацию, сейсморазведку, геохимический анализ проб газа, анализ концентрации метана в атмосфере по данным спектрометра ТРОПОМІ [38, 39], аэрофотосъёмку с БПЛА и вертолётов, позволило получить необходимую информацию для детектирования генезиса опасных объектов взрывной дегазации [33–43].

Уникальная информация была получена в августе 2020 г. во время экспедиции “Ямал-2020” при изучении Бованенковского объекта С17 с применением БПЛА DJI Mavic Pro на двух уровнях полёта (в том числе внутри кратера на 15 м ниже поверхности земли) (рис. 5.3) [18, 40]. В результате фотограмметрической обработки аэрофотоснимков построена цифровая 3D-модель рельефа местности,

кратера и гигантской полости/пещеры (глубина дна до 35 м), сформировавшейся в массиве подземного льда [18, 40]. Характерный вид кратера и полости объекта С17, представленных на физической 3D-модели, изготовленной на 3D-принтере из пластика (рис. 6а), можно объяснить только эндогенным генезисом полости с подтоком газа по разлому субмеридиональной ориентации и/или по флюидопроницаемым пластам в толще ММП с криопэгмами. С помощью специальной обработки 3D-модели объекта С17 было сформировано его представление в виртуальном пространстве (рис. 6б), которое позволяет с применением специального оборудования погружаться в него для изучения любой части объекта [18]. Подобные результаты были получены в ходе экспедиции “Ямал-2024” и последующей обработки данных изучения нового Дуплетного объекта взрыва газа С22 в 2023 г., уникальность которого заключается в его непосредственной близости (около 200 м) от объекта С2, взорвавшегося в 2012 г. [43].

Одним из важнейших достижений РАН 2020 г. признано обоснование авторами статьи генезиса взрывной дегазации Земли в Арктике: “Впервые установлены закономерности формирования опасных газонасыщенных объектов в криолитосфере Земли: газодинамического роста многолетних бугров пучения, мощных выбросов, самовоспламе-



Рис. 6. Физическая 3D-модель (а) и изображение в виртуальной реальности со дна (б) подземной полости с кратером выброса газа Бованенковского объекта С17

нений и взрывов газа с образованием гигантских кратеров” [44, с. 348, 349]. Наши исследования позволили обосновать, что до взрывов в ММП существовали наполненные газом со сверхвысоким (сверхлитостатическим) давлением огромные термокарстовые полости в массивах подземного льда (см. рис. 5, 6), возникшие в местах его плавления снизу под локальным действием теплового потока и/или термосуффозии [33, 34]. При этом на поверхности земли под газодинамическим воздействием формировались многолетние бугры пучения, которые взрывались при преодолении давлением газа упруго-прочностных свойств мёрзлых грунтов.

Более полувека на акваториях многих морей мира изучаются интенсивные проявления дегазации Земли в виде кратеров выбросов газа на дне, также называемых покмарками (rockmarks), и сипов газа (gas seeps), формирующих на эхограммах изображения, названные факелами газа (gas flares) [7]. Данные ДЗЗ из космоса и с применением БПЛА позволяют успешно решать широкий круг задач, связанных с изучением процессов дегазации Земли с мелководного дна арктических термокарстовых озёр, рек и морей [7, 18, 33–43].

В 2014–2024 гг. впервые в результате комплексных аэрокосмических исследований на полуострове Ямал на дне 3551 термокарстового озера и 16 рек обнаружены 4992 зоны мощных выбросов (взрывов) газа в виде кратеров (покмарок) [39–42]. Кроме того, в прибрежных зонах Карского моря выявлено ещё 669 зон взрывной дегазации, преимущественно в губах, заливах, лиманах и бухтах (рис. 7а). С учётом полуострова Югорский и острова Белый всего в регионе исследований найдено 6022 зоны взрывной дегазации. Таким образом, был получен результат, также признанный важнейшим достижением РАН 2020 г.: “Построена не имеющая аналогов картографическая схема распространения зон мощной дегазации со дна термокарстовых озёр, рек и заливов полуострова Ямал, базирующаяся на комплексном анализе данных космосъёмки высокого разрешения и экспедиционных исследований” [44, с. 348].

В ходе исследований плотности распространения зон дегазации в расчёте на 25 км^2 (рис. 7б) сделан вывод, что Нейтинско-Сеяхинский и Сабеттинский районы имеют экстремально высокие показатели (соответственно, 19–36 и 20–22), в связи с чем они признаны наиболее газозрывоопасными. Обосно-

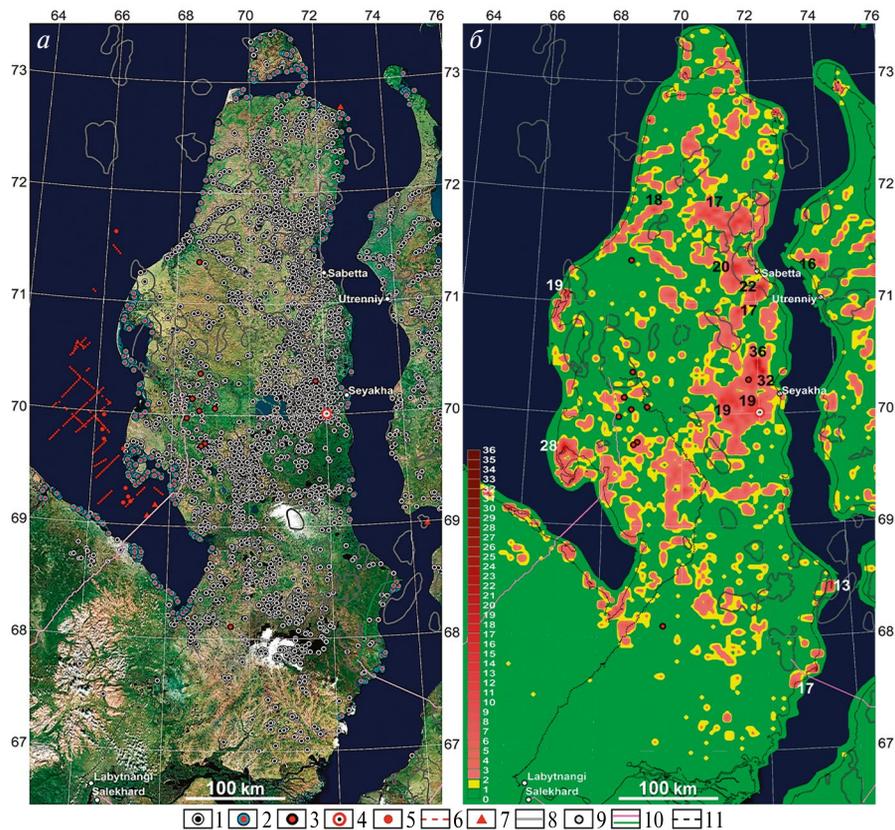


Рис. 7. Схемы распространения зон дегазации Земли с кратерами выбросов газа в Ямальском регионе (а) и плотности распространения зон дегазации (б) (картографическая основа – космоснимок ESRI) [41]

1, 2 – зоны с кратерами на дне термокарстовых озёр, рек (1) и Карского моря (2); 3 – кратеры выбросов газа на суше; 4 – озеро Открытие [36, 37]; 5, 6 – силы газа на шельфе – одиночные интенсивные (5) и менее интенсивные вдоль профилей эхолокации (6) [41]; 7 – выбросы газа при бурении инженерных скважин на шельфе [41]; 8 – месторождения углеводородов; 9 – газопроводы (выделены розовым цветом) и нефтепроводы (зелёный цвет); 10 – города и посёлки; 11 – железная дорога

вано, что возможная интенсивная природная дегазация Земли, особенно происходящая в процессе деградации субаквальных ММП и диссоциации газогидратов, способна кардинально изменить упруго-прочностные свойства придонного грунта, при этом его насыщение газом может нарушить условия строительства различных объектов, включая подводные газопроводы, на которых уже происходили аварийные всплытия [41].

В 2019 г. в итоге специальных исследований ряда термокарстовых озёр в Сеяхинском районе Ямала впервые доказана большая мощность выбросов/взрывов газа со дна глубоких арктических термокарстовых озёр, способных разбить лёд толщиной до 1.5 м, сформировать крупные зоны его деструкции диаметром в десятки метров (по факту до 15–45 м) и разбросать крупные глыбы льда на удалении свыше 50 м от эпицентра взрыва [37]. Экспедиционные исследования “Ямал-2019” с применением разнообразного геофизического инструментария на термокарстовом озере Открытие с кра-

тером выброса газа подтвердили первоначальные выводы. При этом на основе технологии пассивного микросейсмического мониторинга (4D-сейсморастворка) в районе озера Открытие выявлена активная ярко выраженная субвертикальная газогидродинамическая зона [37]. По закономерностям распределения микросейсмических событий обоснована миграция пластовых флюидов (в первую очередь газа) из верхнемеловых водогазонасыщенных отложений сеномана (глубина около 1120 м) с мощными грязевулканическими извержениями со дна озера, в результате которых сформировались четыре гигантских кратера диаметром до 30–40 м.

В 2023 г. впервые на дне арктических термокарстовых озёр Лабварто и Ямбуто по данным ДЗЗ высокого разрешения были обнаружены крупные обособленные поднятия, идентифицированные нами как грязевулканические постройки с явно выраженными кратерами (рис. 8) [18, 35]. На основе мониторинга обстановки по ретроспективным космоснимкам на ямальских озёрах Открытие,

Лабварто и Ямбуто доказано наличие периодических выбросов пластовых флюидов. Во время экспедиции “Ямал-2023” на вершине центральной грязевулканической постройки в озере Лабварто (рис. 8б) была собрана жидкая грязевая брекчия, включающая извергнутые крупные угловатые и округлые образцы мелкодисперсных песчаноглинистых отложений (рис. 8в).

Грязевулканические открытия на полуострове Ямал, дополненные комплексными аналитическими исследованиями различных регионов суши и шельфа Арктики, позволили нам обосновать широкое распространение грязевого вулканизма в Циркумарктическом мегарегионе [35]. В июне 2024 г. завершилась экспедиция Арктического университета Норвегии EXTREME24 в западной части Баренцева моря, в ходе которой было открыто 10 новых грязевых вулканов, подтверждающих ранее сделанный нами вывод.

Не вызывает сомнений, что в ближайшие годы в Арктике нас ждут новые открытия грязевых вулканов и других важных объектов интенсивной дегазации Земли. Мы обосновали, что космические технологии будут предоставлять принципиально новые возможности в решении геологических, геофизических, геохимических, экологических и других задач.

Катастрофическая техногенная дегазация в Арктике. Открытия месторождений углеводородов в XIX и XX вв. часто сопровождалось неконтролируемыми аварийными фонтанами углеводородных смесей, нередко с катастрофическими последствиями. Не вызывает сомнений важность исследования причин возникновения подобных чрезвычайных ситуаций, несущих прямые угрозы национальной безопасности страны, с целью предупреждения их повторения.

Основная причина утечек газа в районах устьев скважин заключается в его просачивании по законным и межколонным каналам (пустоты, макро- и микротрещины), возникающем в результате широко распространённого некачественного цементирования обсадных колонн при строительстве скважин, особенно в Арктике. По данным ООО “Газпром ВНИИГАЗ”, “по самым скромным статистическим оценкам цементный камень разрушен или полностью отсутствует в половине добывающих скважин, эксплуатирующих сеноманские залежи. Оценки сделаны <...> после завершения бурения. Несомненно, к настоящему времени процент скважин с разрушенным цементным камнем гораздо выше” [45]. Это фактически подтверждают данные ООО “Газпром газобезопасность” на основе мониторинговых “обследований 47 устьев морских скважин, включая 27 законсервированных, 15 ликвидированных, а также 5 эксплуатационных скважин в акваториях Баренцева, Карского и Охотского морей, а также Обско-Тазовской губы <...> выявлено 22 устья с источниками барботации газа слабой и средней интенсивности” (46.8%), продолжающейся длительное время [46].

По нашим данным, самая крупная катастрофа в Арктике произошла в ноябре 1980 г. в Ненецком автономном округе в районе устья реки Печора в северной части Кумжинского газоконденсатного месторождения [47]. Здесь 25 мая 1981 г. для ликвидации неконтролируемого мощного фонтана смеси газообразных и жидких углеводородов в специально пробуренной скважине был применён подземный ядерный взрыв “Пирит” мощностью 37.6 килотонны (суммарная мощность взрывов в Хиросиме и Нагасаки), который лишь ухудшил ситуацию. Из-за образовавшейся в верхней части разреза природно-техногенной залежи площадью около 30 км²

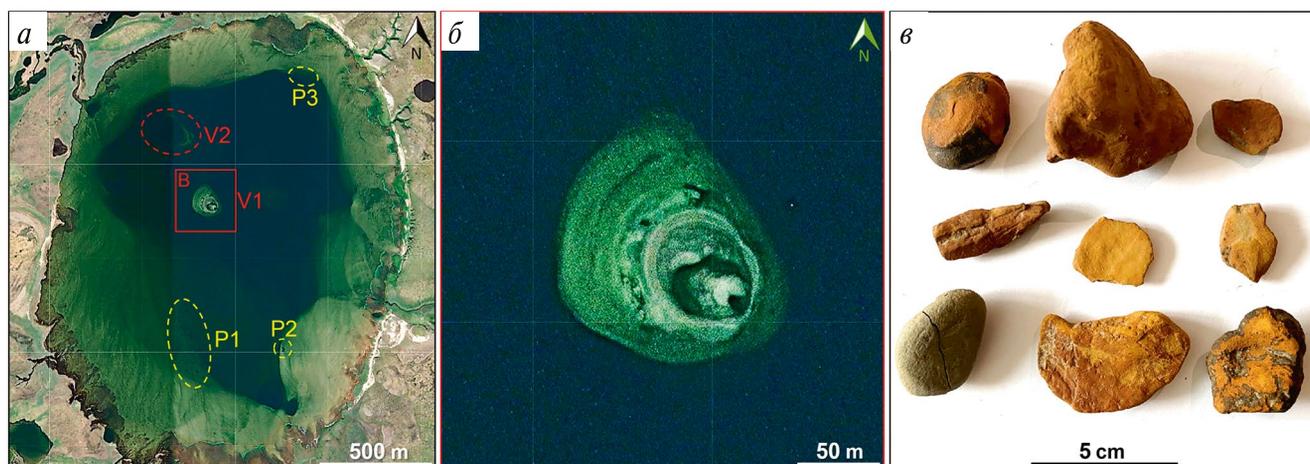


Рис. 8. Космоснимок WorldView-2 термокарстового озера Лабварто (а), его увеличенный фрагмент (б), собранные образцы грязевых брекчий (в)

P1, P2 и P3 – пометки; V1 и V2 – грязевые вулканы

(зафиксированы выходы газа в радиусе до 3 км) газ вырывался в атмосферу в ряде мест, в том числе вблизи скважин № 9, 5, 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. 9а). Побережья протоки Малый Гусинец реки Печора и Печорского моря были загрязнены жидкими углеводородами, при этом сильно пострадала ихтиофауна.

Тяжёлая борьба с катастрофическим фонтанированием на Кумжинском месторождении продолжалась 6.5 лет (2362 суток), фонтан был погашен лишь 18 мая 1987 г. [47]. Однако наши исследования на основе данных ДЗЗ из космоса показали, что эмиссия газа и жидких углеводородов продолжается до настоящего времени. Ежегодно в весенние месяцы это наглядно видно на космоснимках высокого и среднего разрешений, включая WorldView-2 и Sentinel-2, в виде полыней – пробоин во льду и его загрязнений жидкими углеводородами (рис. 9б).

Подобная ситуация наблюдается на ряде других месторождений, на которых во времена СССР происходили катастрофические выбросы газа и нефти. На полуострове Ямал самой долговременной стала ликвидация фонтанирования газа в объёме до 7 млн м³/сут на скважине Бованенковская-118, на которой 21 июня 1984 г. произошёл катастрофический выброс и воспламенение газа. В результате сформировался гигантский кратер (диаметр около 250 м), в котором утонуло всё буровое оборудование. Кроме того, газ выходил по заколонному пространству в виде грифонов и на удаленностях от устья скважины не менее 1.5 км. В дальнейшем газ стал выхо-

дить на поверхность с образованием грифонов на дне соседних озёр, рек, водотоков и заболоченных участков на удаленностях в радиусе как минимум 1.5 км (вероятно, даже до 5–7 км). При этом в разных грифонах газ неоднократно самовоспламенялся, что подтверждено космоснимками Landsat. Борьба с фонтанированием продолжалась более четырёх лет (1517 суток) до ликвидации 15 августа 1988 г. Однако проводимый нами мониторинг ситуации по данным ДЗЗ во время таяния льда однозначно свидетельствует о непрерывно продолжающейся эмиссии газа, создающей проталины во льду (рис. 10а), что подтверждено в ходе экспедиции “Ямал-2021”. На космоснимках также видно значительное поражение тундровой растительности, не восстановившейся даже спустя 36 лет (см. рис. 10).

* * *

Тематика проводимых нами исследований ориентирована на реализацию “Стратегии национальной безопасности Российской Федерации”, в которой к стратегическим национальным приоритетам при обеспечении и защите национальных интересов России отнесены: “Охрана окружающей среды, сохранение природных ресурсов и рациональное природопользование, адаптация к изменениям климата” [48, п. 25.6].

Приведённые в статье результаты исследований – это приоритетное направление научно-технологического развития – “сохранение и рациональное использование природных ресурсов”, которое входит в перечень критических технологий “мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды... предупреждения и снижения рисков

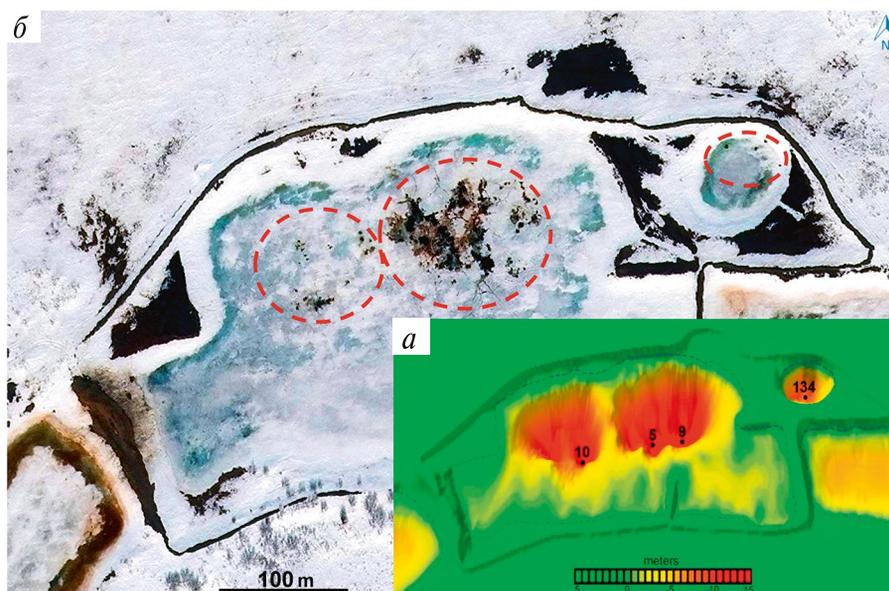


Рис. 9. Катастрофа на Кумжинском месторождении: 3D-модель рельефа местности и дна техногенного водоёма с кратерами (а) и космоснимок WorldView-2 2 мая 2016 г. с полынями – пробоинами во льду (б)



Рис. 10. Космоснимки WorldView-2 14 июня (а) и 21 июля (б) 2014 г. техногенного кратера вокруг устья скважины Бованенковская-118

чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера” [13, п. 7, 19, 20]. Исследования носят междисциплинарный характер (привлекаются знания геологии, геофизики, геохимии, геокриологии, геоморфологии, гляциологии, гидрогеологии, геоэкологии, вулканологии, сейсмологии, спелеологии и других наук).

Среди основных научных результатов выделим следующие.

1. В результате широкого комплекса исследований Циркумарктического мегарегиона получены принципиально новые знания о перспективах нефтегазоносности осадочного чехла и разновозрастного гетерогенного фундамента, а также насыщенности газом в свободном и гидратном состояниях верхней части осадочных отложений.

2. Впервые по данным сейсморазведки методом преломлённых волн выполнено картирование распространения мёрзлых и талых пород на шельфе морей Восточной Сибири, подтверждённое бурением и кардинально отличающееся от всех построений других исследователей.

3. Разработан комплекс новых технологий, включая 4D-сейсморазведку в условиях близких к реальному времени, повышающих эффективность и экологическую безопасность освоения месторождений нефти и газа на суше и акваториях Арктики.

4. На основе междисциплинарных исследований и широкого комплекса экспедиционных работ дано принципиально новое обоснование генезиса образования гигантских кратеров в Арктике, подразумевающее формирование под действием эндогенных процессов газонасыщенных полостей в массивах подземного льда. При этом под газодинамическим воздействием аномально высоких и сверхлитостатических давлений формируются бугры пучения, которые разрушаются мощными импульсными выбросами газа, усиливающимися его самовоспламенениями и взрывами.

5. В 2014–2024 гг. впервые по данным ДЗЗ из космоса на дне мелководных водоёмов полуострова Ямал и прибрежных частей Карского моря выявлено 6022 зоны интенсивной (взрывной) дегазации с формированием кратеров (покмарок) и обоснована способность подводных импульсных выбросов-взрывов разрушать ледовое покрытие толщиной до 1.5 м.

6. В 2023 г. впервые по данным ДЗЗ из космоса на дне арктических термокарстовых озёр обнаружены крупные грязевулканические постройки с явно выраженными кратерами, при этом сделан вывод о широком распространении грязевого вулканизма в Циркумарктическом мегарегионе, подтверждённый новыми открытиями 2024 г.

7. Исследованы причины и последствия многолетних катастрофических техногенных выбросов и самовоспламенений газа при бурении поисково-разведочных скважин в Арктике на ряде месторождений, включая Кумжинское и Бованенковское.

Результаты исследований способствуют повышению безопасности функционирования объектов нефтегазового комплекса, а также судоходства в Арктике благодаря снижению рисков возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с взрывными выбросами газа из криолитозоны. Обосновано, что космические технологии будут предоставлять принципиально новые возможности в решении геологических, геофизических, геохимических, экологических и других задач.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках госзадания ИПНГ РАН по теме “Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата” (№ 122022800264-9).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность за долговременную поддержку проводимых экспедиционных работ на полуострове Ямал и научное сотрудничество РАН, РФФИ, правительству Ямало-Ненецкого автономного округа, ПАО “Газпром”, включая ООО “Газпром добыча Надым”, ООО “Газпром добыча Ямбург” и АО “Газпром ВНИИГАЗ”, ПАО “НОВАТЭК”, ООО “Ямал СПГ”, НП “Российский центр освоения Арктики”, ГК “Роскосмос”, АО “МАГЭ”, СП “Вьетсовпетро”, АО “АКИН”, ГЕОХИ РАН, ООО “НПЦ Геотех”.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гамбурцев Г.А.* Глубинное сейсмическое зондирование земной коры // Докл. АН СССР. Новая сер. XXXVII. 1952. № 6. С. 943–946.
Gamburtsev G.A. Deep seismic sounding of the Earth's crust // Dokl. USSR Academy of Sciences. New ser. XXXVII. 1952, no. 6, pp. 943–946. (In Russ.)
2. *Mayne W.H.* Common reflection point horizontal data stacking techniques // Geophysics. 1962, vol. 27, iss. 6, pp. 927–938. <https://doi.org/10.1190/1.1439118>
3. *Богоявленский В.И., Полякова И.Д.* Перспективы открытия крупных месторождений нефти и газа в Южно-Карском регионе // Бурение и нефть, 2011. № 1. С. 8–11.
Bogoyavlensky V.I., Polyakova I.D. Prospects for the discovery of large oil and gas fields in the South Kara region // Drilling and oil. 2011, no. 1, pp. 8–11. (In Russ.)
4. *Богоявленский В.И., Полякова И.Д., Будагова Т.А., Богоявленский И.В.* Геолого-геофизическая изученность и нефтегазоносность акваторий циркумарктического сегмента Земли // Геология нефти и газа. 2011. № 6. С. 45–58.
Bogoyavlensky V.I., Polyakova I.D., Budagova T.A., Bogoyavlensky I.V. Geological and geophysical knowledge and oil and gas potential of the water areas of the circum-Arctic segment of the Earth // Geology of Oil and Gas. 2011, no. 6, pp. 45–58. (In Russ.)
5. *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.
Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Bogoyavlenskaya O.V., Nikonov R.A. Prospects for oil and gas content of sedimentary basins and the basement of the Circumarctic region // Geology of Oil and Gas. 2017, no. 5, pp. 5–20. (In Russ.)
6. *Богоявленский В.И., Лавёров Н.П.* Стратегия освоения морских месторождений нефти и газа Арктики // Морской сборник. 2012. № 6. С. 50–58.
Bogoyavlensky V.I., Laverov N.P. Strategy for the development of offshore oil and gas fields in the Arctic // Marine collection. 2012, no. 6, pp. 50–58. (In Russ.)
7. *Богоявленский В.И.* Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов // Труды Вольного экономического общества России. 2014. Т. 182. № 3. С. 12–175.
Bogoyavlensky V.I. The Arctic and the World Ocean: current state, prospects and problems of developing hydrocarbon resources // Proceedings of the Free Economic Society of Russia. 2014, vol. 182, no. 3, pp. 12–175. (In Russ.)
8. *Богоявленский В.И., Урунов А.К., Будагова Т.А., Добрынин С.В.* Анизотропные свойства осадочного чехла континентального шельфа // Газовая промышленность. 1997. № 7. С. 16–18.
Bogoyavlensky V.I., Urupov A.K., Budagova T.A., Dobrynin S.V. Anisotropic properties of the sedimentary cover of the continental shelf // Gas Industry. 1997, no. 7, pp. 16–18. (In Russ.)
9. Морская доктрина Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 31 июля 2022 г. № 512. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/48215/>
Maritime doctrine of the Russian Federation. Approved by Decree of the President of the Russian Federation dated July 31, 2022. No. 512. (In Russ.)
10. *Казанин Г.С., Казанин А.Г., Базилевич С.О.* Основные результаты геофизического изучения акваторий Арктики ОАО “МАГЭ”, проблемы разработки и применения отечественных геофизических комплексов морской сейсморазведки // Арктика: экология и экономика. 2020. № 3 (39). С. 99–111.
Kazanin G.S., Kazanin A.G., Bazilevich S.O. Main results of geophysical studies of the Arctic offshore areas at JSC “MAGE”, development and implementation problems of domestic geophysical equipment for marine seismic survey. Arctic: Ecology and Economy. 2020, no. 3 (39), pp. 99–111. (In Russ.)
11. *Lando M., Solheim O.A., Hilde E. et al.* The Gullfaks 4D seismic study // Petroleum Geosciences. vol. 5, p. 213–226. <https://doi.org/10.1144/petgeo.5.3.213>
12. *Арабский А.К., Башкин В.Н., Богоявленский В.И. и др.* ООО “Газпром добыча Ямбург”: 40 лет инновационного развития. Коллективная монография. М.: Изд. дом “Недра”, 2024.
Arabsky A.K., Bashkin V.N., Bogoyavlensky V.I. et al. Gazprom Dobycha Yamburg LLC: 40 years of innovative development. Collective monograph. M.: Publishing House “Nedra”, 2024. (In Russ.)
13. Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоёмких технологий. Указ Президента РФ от 18 июня 2024 г. № 529. <http://kremlin.ru/acts/news/74328/>
On approval of priority areas of scientific and technological development and the list of the most important science-intensive technologies. Decree of

- the President of the Russian Federation of June 18, 2024. No. 529. (In Russ.).
14. Price L.C., Clayton J.L., Rumen L.L. Organic geochemistry of the 9.6 km Bertha Rogers-1 Well, Oklahkoma // *Journal of Organic Geochemistry*. 1981, vol. 3, pp. 59–77.
 15. Price L.C. The organic geochemistry (and causes thereof) of high rank rocks from the Ralph Lowe-1 and other well bores. US Geology Survey, Open-file Report 88–651, 1991.
 16. Трофимук А.А. Вклад учёных Сибирского отделения АН СССР (СО РАН) в становление и развитие Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Повышение эффективности освоения газовых месторождений Крайнего Севера. М.: Наука, 1997. С. 25–34.
Trofimuk A.A. The contribution of scientists of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences (SB RAS) to the formation and development of the West Siberian oil and gas province // Increasing the efficiency of development of gas fields of the Far North. M.: Nauka, 1997, pp. 25–34. (In Russ.)
 17. Хант Дж.М. Геохимия и геология нефти и газа. М.: Мир, 1982.
Hunt J.M. Petroleum Geochemistry and Geology. Oxford: W.H. Freeman, 1979.
 18. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Кушанков А.В. и др. Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата // Актуальные проблемы нефти и газа. 2023. № 3 (42). С. 235–263. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2023-42.art15
Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kishankov A.V. et al. 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), pp. 235–263. (In Russ.)
 19. 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.
Bogoyavlensky 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 // *Geology of oil and gas*. 2016, no. 5, pp. 102–116. (In Russ.)
 20. 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.
Bogoyavlensky V.I., Kerimov V.Yu., Olkhovskaya O.O. Dangerous gas-saturated objects in the waters of the World Ocean: Sea of Okhotsk // *Oil industry*. 2016, no. 6, pp. 43–47. (In Russ.)
 21. Богоявленский В.И., Казанин А.Г., Кушанков А.В., Казанин Г.А. Дегазация Земли в Арктике: комплексный анализ факторов мощной эмиссии газа в море Лаптевых // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 2. С. 178–194.
Bogoyavlensky V.I., Kazanin A.G., Kishankov A.V., Kazanin G.A. Degassing of the Earth in the Arctic: a comprehensive analysis of the factors of powerful gas emissions into the Laptev Sea // *Arctic: ecology and economy*. 2021, vol. 11, no. 2, pp. 178–194. (In Russ.)
 22. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlensky I. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas // *Geosciences*. 2018, vol. 8, 453. DOI:10.3390/geosciences8120453
 23. Богоявленский В.И., Кушанков А.В., Казанин А.Г. Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 1. С. 70–76. <https://doi.org/10.31857/S2686739721090048>
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, part 1, pp. 766–771. DOI: 10.1134/S1028334X2109004X
 24. Богоявленский В.И., Кушанков А.В., Казанин А.Г. Мерзлота и газогидраты на Арктическом шельфе Восточной Сибири // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 110–117. DOI: 10.31857/S268673972260134X
Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A. Permafrost and Gas Hydrates on the East Siberian Arctic Shelf // *Doklady Earth Sciences*. 2022, vol. 507, part 1, pp. 946–951. DOI: 10.1134/S1028334X22600578
 25. 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, 106050. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.106050>
 26. Богоявленский В.И., Кушанков 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. 378–392. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-378-392
Bogoyavlensky V.I., Kishankov A.V., Kazanin A.G. Distribution of subaqueous permafrost in the Laptev Sea according to seismic data using the refracted wave method // *Arctic: ecology and economy*. 2023, vol. 13, no. 4, pp. 378–392. (In Russ.)
 27. Brown J., Ferrians O.J.J., Heginbottom J.A., Melnikov E.S. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Washington, D.C., U.S. Geological Survey in Cooperation with the Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, 2001. <https://doi.org/10.3133/cp45>

28. *Angelopoulos M., Overduin P.P., Miesner F. et al.* Recent advances in the study of Arctic submarine permafrost // *Permafrost and Periglacial Process*, John Wiley & Sons Ltd. 2020, vol. 31, pp. 442–453. <https://doi.org/10.1002/ppp.2061>
29. *Romanovskii N.N., Tumskoi V.E.* Retrospective approach to the estimation of the contemporary extension and structure of the shelf cryolithozone in East Arctic // *The Cryosphere of the Earth*. 2011, vol. 15 (1), pp. 3–14.
30. *Matveeva T.V., Kaminsky V.D., Semenova A.A., Shchur N.A.* Factors Affecting the Formation and Evolution of Permafrost and Stability Zone of Gas Hydrates: Case Study of the Laptev Sea // *Geosciences*. 2020, vol. 10, 504. DOI: 10.3390/geosciences10120504
31. *Bukhanov D., Chuvilin E., Zhmaev M. et al.* In Situ Bottom Sediment Temperatures in the Siberian Arctic Seas: Current State of Subsea Permafrost in the Kara Sea vs Laptev And East. Siberian Seas // *Marine and Petroleum Geology*. 2023, vol. 1 (157), 106467. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2023.106467
32. *Петров О.В., Никушин А.М., Петров Е.И. и др.* Результаты стратиграфического бурения в Восточно-Сибирском море с целью геологического изучения зоны сочленения структур континентального шельфа и глубоководных акваторий Северного Ледовитого океана // *Доклады РАН*. 2023. Т. 512 (2). С. 100–110. DOI: 10.31857/S268673972360100X
Petrov O.V., Nikushin A.M., Petrov E.I. et al. Results of stratigraphic drilling in the East Siberian Sea for the purpose of geological study of the junction zone of the continental shelf structures and deep waters of the Arctic Ocean // *Doklady Earth Sciences*. 2023, vol. 512 (2), pp. 1014–1023. DOI: 10.1134/S1028334X23601256
33. *Богоявленский В.И.* Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // *Горная промышленность*. 2020. № 1. С. 97–118. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118
Bogoyavlensky V.I. Natural and technogenic threats in fossil fuels production in the Earth cryolithosphere // *Russ. Min. Ind.* 2020, no. 1, pp. 97–118. (In Russ.)
34. *Богоявленский В.И.* Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // *Арктика: экология и экономика*. 2021. Т. 11. № 1. С. 51–66. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-51-66
Bogoyavlensky V.I. Fundamental aspects of the catastrophic gas blowout genesis and the formation of giant craters in the Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*. 2021, vol. 11, no. 1, pp. 51–66. (In Russ.)
35. *Богоявленский В.И.* Новые данные о грязевом вулканизме в Арктике на полуострове Ямал // *Доклады РАН*. 2023. Т. 512. № 1. С. 92–99. DOI: 10.31857/S2686739723601084
Bogoyavlensky V.I. New Data on Mud Volcanism in the Arctic on the Yamal Peninsula // *Doklady Earth Sciences*. 2023, vol. 512 (1), pp. 847–853. DOI: 10.1134/S1028334X23601116
36. *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.
Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kargina T.N., Nikonov R.A. Digital technologies for remote monitoring and the development of heaving mounds and reduction of catastrophic global gases in the Arctic // *Arctic: ecology and economy*. 2020, no. 4 (40), pp. 90–105.
37. *Богоявленский В.И., Ерохин Г.Н., Никонов Р.А. и др.* Изучение зон катастрофических выбросов газа в Арктике на основе пассивного микросейсмического мониторинга (на примере озера Открытие) // *Арктика: экология и экономика*. 2020. № 1 (37). С. 93–104. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-93-104
Bogoyavlensky V.I., Erokhin G.N., Nikonov R.A. et al. Study of catastrophic gas blowout zones in the Arctic based on passive microseismic monitoring (on the example of Lake Otkrytiye) // *Arctic: Ecology and Economy*. 2020, no. 1 (37), pp. 93–104. (In Russ.)
38. *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.
Bogoyavlensky V.I., Sizov O.S., Nikonov R.A. et al. Earth degassing in the Arctic: the genesis of natural and anthropogenic methane emissions // *Arctic: Ecology and Economy*. 2020, no. 3 (39), pp. 6–22. (In Russ.)
39. *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.
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 // *Arctic: Ecology and Economy*. 2022, vol. 12, no. 3, pp. 304–319. (In Russ.)
40. *Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н.* Катастрофический выброс газа в 2020 г. на полуострове Ямал в Арктике. Результаты комплексного анализа данных аэрокосмического зондирования // *Арктика: экология и экономика*. 2021. Т. 11. № 3. С. 362–374.
Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kargina T.N. Catastrophic gas blowout in 2020 on the Yamal Peninsula in the Arctic. Results of comprehensive

- analysis of aerospace RS data // *Arctic: Ecology and Economy*. 2021, vol. 11, no. 3, pp. 362–374. (In Russ.)
41. *Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А.* Взрывная дегазация Земли на полуострове Ямал и прилегающей акватории Карского моря // *Арктика: экология и экономика*. 2024. Т. 14. № 2. С. 177–191. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-177-191
Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Nikonov R.A. Explosive degassing of the Earth on the Yamal Peninsula and the adjacent Kara Sea // *Arctic: Ecology and Economy*. 2024, vol. 14, no. 2, pp. 177–191. (In Russ.)
42. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al.* Seyakha catastrophic gas blowout and explosion from the cryosphere of the Arctic Yamal Peninsula // *Cold Regions Science and Technology*. 2022, vol. 196, 103507. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103507>
43. *Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А.* Мониторинг развития Дуплетного объекта взрыва газа С22 на полуострове Ямал по данным дистанционного зондирования Земли // *Арктика: экология и экономика*. 2024. Т. 14. № 3. С. 318–331.
Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Nikonov R.A. Development monitoring of the C22 gas blowout Doublet object on Yamal peninsula using remote sensing data // *Arctic: Ecology and Economy*. 2024, vol. 14, no. 3, pp. 318–331. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-318-331. (In Russ.)
44. Материалы общего собрания членов Российской академии наук 20 апреля 2021 года. М. 2021.
Materials of the general meeting of members of the Russian Academy of Sciences on April 20, 2021. М. 2021.
45. *Самсонов Р.О., Казак А.С., Башкин В.Н., Лесных В.В.* Системный анализ геоэкологических рисков в газовой промышленности. М.: Научный мир, 2007.
Samsonov R.O., Kazak A.S., Bashkin V.N., Lesnykh V.V. System analysis of geo-ecological risks in the gas industry. М.: Scientific world, 2007.
46. *Сверчков С.В.* Особенности обеспечения противоблужетной безопасности в Арктической зоне РФ. Презентация. RAO/CIS Offshore 2023.
Sverchkov S.V. Features of ensuring blowout safety in the Arctic zone of the Russian Federation. Presentation. RAO/CIS Offshore 2023.
47. *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.
Bogoyavlensky V.I., Perekalin S.O., Boychuk V.M. et al. Disaster at the Kumzhinskoye gas condensate field: causes, results, ways to eliminate the consequences // *Arctic: ecology and economy*. 2017, no. 1 (25), pp. 32–46.
48. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации. Утверждена Указом Президента РФ от 2 июля 2021 г. № 400. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046>
National Security Strategy of the Russian Federation. Approved by Decree of the President of the Russian Federation of July 2, 2021, No. 400. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046>

GEOPHYSICAL METHODS OF ENSURING TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY AND NATIONAL SECURITY OF RUSSIA IN THE ARCTIC

V.I. Bogoyavlensky^{a,*}, I.V. Bogoyavlensky^{a,}, A.V. Kishankov^{a,***}**

^a*Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: geo.ecology17@gmail.com*

***E-mail: ivb@ipng.ru*

****E-mail: alexey137k@yandex.ru*

The article discusses the achievements and problems of geological exploration in the Arctic offshore areas. The authors of the article obtained fundamentally new knowledge about the prospects for oil and gas content of the sedimentary cover and heterogeneous basement, as well as gas saturation in the free and hydrated states in the upper part of sedimentary deposits. A complex of new technologies has been developed, including 4D seismic exploration in near real time conditions. For the first time, seismic refraction data were used to map the distribution of frozen and thawed ground on the shelf of the seas of Eastern Siberia. A fundamentally new justification has been given for the gas-dynamic genesis of the formation of giant craters in the Arctic, which implies the formation of gas-saturated cavities in the masses of ground ice under the influence of endogenous processes. According to remote

sensing of the Earth (RS) from space on the shallow bottom of thermokarst lakes and rivers of the Yamal Peninsula, as well as coastal parts of the Kara Sea, 6022 zones of intense (explosive) degassing with the formation of craters (pockmarks) were revealed. For the first time, according to RS data from space, large mud-volcanic edifices with pronounced craters were discovered at the bottom of the Arctic thermokarst lakes. Causes and consequences of catastrophic man-made gas blowouts and self-ignition during drilling of exploratory wells at a number of fields in the Arctic were investigated.

Keywords: Arctic, oil and gas content, permafrost, Earth degassing, gas explosions, gas hydrates, disasters, seismic exploration, remote sensing of the Earth (RS), UAVs.