

Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли

В.И. Богоявленский

Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

✉ vib@pgc.su

Резюме: Показана ведущая роль России в добыче горючих (нефть, газ и уголь) полезных ископаемых в Арктике. Проведен комплексный анализ особенностей и проблем их добычи в условиях криолитосферы. Выявлены общие закономерности возникновения чрезвычайных ситуаций, связанные с высоким газонасыщением верхней части разреза и аварийными выбросами газа. Обоснованы механизмы формирования газонасыщенных полостей, в том числе за счет газовых разрывов пласта при сверхвысоких (сверхгеостатических) давлениях (СВД). Газонасыщенные полости с СВД угрожают горными ударами в шахтах с катастрофическим выбросом газа, угля и горной породы, а также приводят к росту многолетних бугров пучения и катастрофическим выбросам, самовоспламенениям и взрывам газа на поверхности земли и воды термокарстовых озер, рек и морей. Показана необходимость расширения комплексных исследований в области природной и техногенной дегазации Земли.

Ключевые слова: Арктика, криолитосфера, газовые гидраты, добыча горючих ископаемых, дистанционное зондирование Земли, термокарсты, газонасыщенные полости, вулканы, аномально высокие пластовые давления, сверхвысокие давления, дегазация, выбросы газа и угля, взрывы газа, метаноопасность, газовый разрыв пласта

Благодарности: Работа выполнена по государственному заданию по теме «Рациональное природопользование и эффективное освоение нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли» (№ АААА-А19-119021590079-6). Автор выражает признательность академику РАН Ю.Н. Малышеву и член-корреспонденту РАН В.Н. Захарову за ценные советы и рекомендации.

Для цитирования: Богоявленский В.И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли. *Горная промышленность*. 2020;(1):97–118. DOI 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118.

Natural and technogenic threats in fossil fuels production in the Earth cryolithosphere

V.I. Bogoyavlensky

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

✉ vib@pgc.su

Abstract: The leading role of Russia in fossil fuels (oil, gas and coal) production in the Arctic is shown. A comprehensive analysis of fossil fuels mining challenges and peculiarities in the cryolithosphere has been carried out. The general patterns of emergencies associated with high gas saturation of the upper part of the section and gas blowouts have been revealed. The mechanisms of gas-saturated cavities leading to the formation have been substantiated, including those formed by layers gas ruptures caused by ultrahigh (more than geostatic) pressure (UHP). Gas-saturated cavities with UHP threaten rock bumps in mines with and catastrophic blowouts of gas, coal and rocks. They can also lead to the growth of perennial frost mounds and catastrophic blowouts into the atmosphere, self-ignition and gas explosions on the surface of the Earth and water of thermokarst lakes, rivers and seas. The necessity of expanding comprehensive research in the field of natural and technogenic degassing of the Earth is shown.

Keywords: Arctic, cryolithosphere, gas hydrates, fossil fuels mining, remote sensing of the Earth, thermokarsts, gas-saturated cavities, abnormal reservoir pressure, ultrahigh pressures, degassing, gas and coal blowouts, gas explosions, methane danger, gas rupture of the layer

Acknowledgements: The work was executed following the state assignment under the topic of "Sustainable environmental management and effective development of oil and gas resources of the Arctic and Sub-Arctic Earth zones" (No. АААА-А19-119021590079-6).

The author expresses his gratitude to Academician of the Russian Academy of Sciences Yu.N. Malyshev and Corresponding Member of RAS V.N. Zakharov for valuable advice and recommendations

For citation: Bogoyavlensky V.I. Natural and technogenic threats in fossil fuels production in the Earth cryolithosphere. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2020;(1):97–118. (In Russ.) DOI 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118.

Введение: добыча горючих ископаемых в Арктике

В результате геологических исследований в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) выявлены гигантские ресурсы горючих ископаемых, включая углеводороды (УВ) и уголь, в сочетании с экстремально сложными горно-геологическими условиями и сильной уязвимостью экосистемы. Необходимость расширения минерально-сырьевой базы России и сохранения достигнутых объемов добычи УВ наряду с «сохранением и обеспечением защиты природной среды Арктики, ликвидацией экологических последствий хозяйственной деятельности в условиях возрастающей экономической активности и глобальных изменений климата» зафиксирована в «Основах государственной политики РФ в Арктике на период до 2020 г. и дальнейшую перспективу», утвержденных Президентом РФ 18 сентября 2008 г. (№ Пр-1969), и в ряде других государственных документов, определяющих стратегию развития нефтегазовой отрасли.

В криосфере Земли (две третьих территории России и четверть территории суши северного полушария) широко распространены многолетнемерзлые породы (ММП), которые значительно усложняют все виды жизнедеятельности человека, особенно связанные со строительством и функционированием объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК), включая строительство и эксплуатацию шахт, скважин, нефтегазопроводов, аэропортов и железных дорог. Мощность ММП на отдельных территориях АЗРФ превышает один километр, достигая 1150 м в Мархинской скважине (забой 1850 м, пробурена в 1963 г.) на северо-западе Якутии, при этом нулевая изотерма вскрыта на глубине 1450 м. ММП существуют даже на юге Якутии и в Иркутской области. В частности, они вскрыты в Южно-Якутском угольном бассейне (Нерюнгринское месторождение, 56,72° с.ш., 124,573° в.д. и др.), расположенном в более чем в тысяче километров южнее Полярного круга.

Безопасное функционирование предприятий ТЭК в Арктике и реализация новых проектов, многие из которых относятся к шельфовым, зависят от успеха преодоления многочисленных природных и техногенных угроз. В последние десятилетия за счет влияния потепления климата, наиболее сильно сказывающегося в Арктике, в целом уровень угроз усилился, включая активизацию таяния ММП, хотя в отдельных зонах температура ММП не повысилась. Мониторинг температурного режима ММП в 2007–2016 гг. в 123 скважинах показал, что в 71 скважине (57,7%) температура увеличилась, в 40 (32,5%) – не изменилось, а в 12 (9,8%) – даже снизилась [1]. При этом наибольшие десятилетние повышения температуры ММП – около 0,9°С – зафиксированы в Сибири в районе стационаров Марре-Сале (69,715° с.ш., 66,817° в.д., 80 км юго-западнее Бованенково) и на острове Самойловский (72,37° с.ш., 126,49° в.д.).

Первые в Арктике нефтегазодобывающие проекты были реализованы в России: Мессояхское газовое месторождение в 1969 г. и Медвежье газоконденсатное месторождение в 1972 г. 27 декабря 2019 г. отмечено 50-летие со дня начала разработки месторождений УВ в АЗРФ, ознаменовавшееся официальным принятием в эксплуатацию газопровода протяженностью 263 км и диаметром 720 мм, идущего от Мессояхского месторождения в г. Норильск и на Норильский горно-металлургический комбинат им. А.П. Завенягина (ныне ПАО «ГМК «Норникель»).

За полувековую историю в АЗРФ добыто около 19,7 млрд т нефтяного эквивалента (н.э.) нефти и газа (рис. 1). Это составляет около 86,9% общей добычи в Арктике (22,6 млрд т н.э.),

осуществляемой в четырех странах: Россия, США (Аляска), Канада и Норвегия. Доля России в «арктической добыче» ежегодно растет и в 2018 и 2019 гг. составила 93,6 и 94%. Рост объемов добычи УВ в России в последние годы обеспечен главным образом новыми проектами, реализуемыми в АЗРФ. Основные запасы и ресурсы УВ России расположены в условиях криолитосферы, имеющей продолжение на акваториях Арктики.

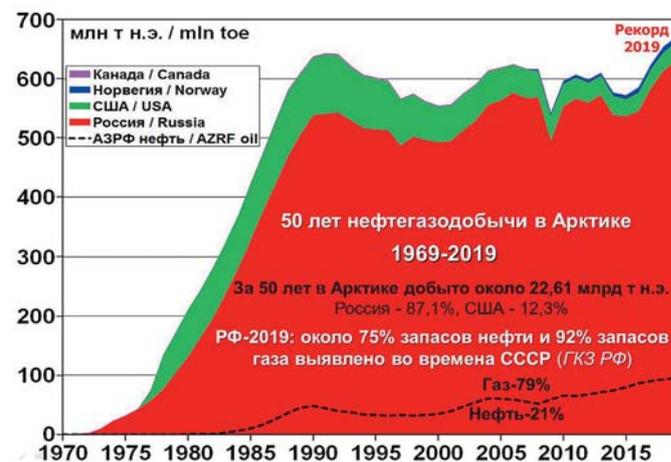


Рис. 1
Добыча углеводородного сырья в арктических зонах России, США, Норвегии и Канады в 1969–2019 гг.

Fig. 1
Hydrocarbon production in the Arctic zones of Russia, USA, Norway and Canada in 1969–2019

Около 90 лет Россия ведет добычу угля в Заполярье в зоне развития ММП. Первая промышленная добыча была организована в начале 1930-х годов на Шпицбергене Трестом «Арктикуголь» (ныне ФГУП «Государственный трест «Арктикуголь») и достигла пикового значения 0,5 млн т в 1970 г. На Шпицбергене в Ис-фьорде расположена самая северная шахта России «Пирамида» (78,656° с.ш., 16,325° в.д.), которая в настоящее время, как и шахта «Груммант», законсервирована. Добыча в небольших объемах (около 120 тыс. т в год) ведется на шахте «Баренцбург» (78,067° с.ш., 14,217° в.д.). Мощность ММП на Шпицбергене достигает 150–450 м.

С 1931 г. ведется добыча на Воркутинском месторождении (67,5° с.ш., 64° в.д.) Печорского угольного бассейна, а в 1934 г. началась отгрузка угля по железной дороге. В настоящее время добыча ведется АО «Воркутауголь» (дочернее предприятие ПАО «Северсталь») на одном угольном разрезе и в пяти шахтах. Добыча угля в 2015 г. составила 13,2 млн т, но в последующие годы значительно снизилась из-за катастрофы 2016 г. в шахте «Северная» (см. ниже), до 9,6 млн т в 2016 и 2018 гг., 8,6 млн т в 2017 г. и 10,25 млн т в 2019 г.¹

В восточной части АЗРФ на территории Чукотского АО (Беринговский бассейн) добыча началась в 1941 г. в шахте «Нагорная», находящейся с 2018 г. в ликвидации. Добыча идет на месторождениях Анадырское (ОАО «Шахта Угольная») и Фандюшкинское поле (австралийская ООО «Берингпромуголь», с 2017 г. на Амаамской площади). Общая добыча в 2017 и 2018 гг. составила 445 и 715,5 тыс. т. Планируется дальнейший рост угледобычи для экспорта.

Поисково-разведочные работы и пробная добыча угля проводились в Таймырском бассейне Угольной компанией «ВостокУголь» (ООО «Арктическая горная компания») в западной части полуострова Таймыр (Малолемберовское,

¹ «Воркутауголь» в 2018 году показала рост по всем показателям производства. Режим доступа: https://vorkutaugol.ru/rus/press_center/news/document2958.phtml

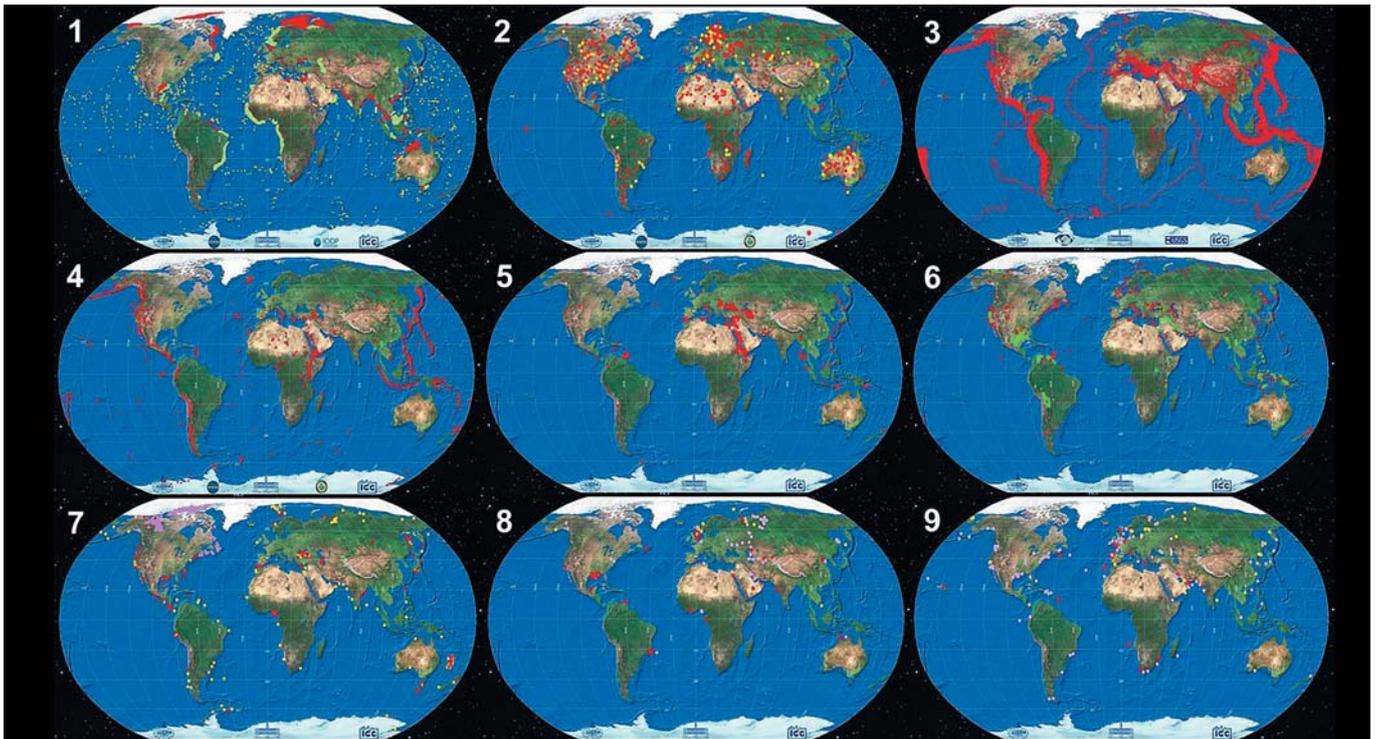


Рис. 2
Тематические разделы ГИС «АМО»: месторождения нефти и газа и площади глубоководного бурения IODP в Мировом океане (1), метеоритные кратеры (2), землетрясения (3), стратовулканы (4), грязевые вулканы (5), сипы нефти и газа (6), газовые гидраты (7), районы крупнейших катастроф при добыче (8) и транспортировке (9) углеводородов [7–27]

Fig. 2
Thematic sections of the "AMO" GIS: oil and gas fields and deep-water drilling areas of IODP in the World Ocean (1), meteor craters (2), earthquakes (3), stratovolcanoes (4), mud volcanoes (5), oil and gas seeps (6), gas hydrates (7), areas of major catastrophes in the production (8) and transportation (9) of hydrocarbons [7–27].

Нижнелемберовское и др. месторождения), при этом были заявлены планы довести добычу до 10–20 млн т в 2024 г. с возможным дальнейшим увеличением до 30 млн т (<http://vostokcoal.ru/>). В связи с претензиями Росприроднадзора проект временно заморожен. Очевидно, что сроки его возможной реализации сдвигаются.

На севере Красноярского края в Заполярье в зоне развития ММП в конце XIX – начале XX в. был открыт ряд месторождений угля самого крупного в мире Тунгусского угольного бассейна (Гор Шмидта и Надежды, Кайерканское, Имангдинское, Курейское и др. [2]). Долгие годы уголь был основным источником энергообеспечения Норильска и предпринятый ПАО «ГМК «Норникель», но с начала 1970-х годов на смену углю пришел газ, шахты и разрезы были законсервированы (небольшая добыча ведется на разрезе Кайерканский № 2 – 124 тыс. т в 2007 г.).

Таким образом, в 2017 и 2018 гг. добыча угля в Заполярье отечественными компаниями составила около 9,3 и 10,5 млн т, что составляет около 2,3 и 2,4% от общероссийской добычи. Очевидно, что добыча УВ и угля в Арктике может быть существенно увеличена, однако она сдерживается сложностью работ в экстремальных природно-климатических условиях, наличием ММП, высокой метанообильностью пластов и относительно высокой себестоимостью.

Отметим, что в России, как и в ряде других стран, традиционно под отчетным объемом добычи угля понимается валовая добыча горной массы (уголь, включая пустую породу). Согласно государственной отчетности ЦДУ ТЭК и МПР России в 2017 и 2018 гг. валовая добыча углей составила 407,9 и 432,7 млн т, а добыча всех типов по маркшейдерским замерам – 369,5 и 398,1 млн т². При этом в 2018 г.

Россия заняла 6-е место в мире с 4,97% мировой добычи, Китай – 46,0%, а шесть лидеров вместе – 81,9%³. В 2018 г. общероссийская добыча превысила рекорд времен СССР – 425,4 млн т в 1988 г.

Традиционное ведомственное разделение отрасли добычи горючих ископаемых на угольную и нефтегазовую составляющие значительно разобщило и сузило научную направленность работы специалистов, хотя сам процесс формирования угля, газа и нефти в значительной степени взаимосвязан. Процесс формирования угля из торфа сопровождается образованием больших объемов метана, часть которого (ранняя стадия) улетучивается в атмосферу, а другая, образующаяся в процессе метаморфических преобразований, удерживается в угольных пластах или мигрирует и формирует самостоятельные залежи (по В.И. Вернадскому – скопления [3]) в пластах-резервуарах, экранированных слабопроницаемыми породами (покрышками). В качестве примера отметим, что таким путем сформировалась значительная часть гигантских апт-сеноманских залежей биогенного газа (изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ от $-50,9$ до $-64,7$ ‰) севера Западной Сибири (Уренгой, Ямбург, Бованенково и др.) (см. [4; 5] и др.). Число угольных пластов в покурской серии во многих скважинах достигает 10–30, не считая больших объемов рассеянной органики. Поэтому АЗРФ обладает большим потенциалом открытия новых месторождений УВ и угля. В 1980-х – начале 1990-х годов на Шпицбергене во время бурения скважин Трестом «Арктикуголь» для разведки угля в районе поселка Пирамида (Бухта Петунья) дважды происходили неконтролируемые выбросы газа и жидких УВ, свидетельствующие о возможности открытия коммерческих запасов УВ [6, с. 17].

2 Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2018 году. М.: МПР России; 2019. С. 59.

3 Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2018 году. М.: МПР России; 2019. С. 61

Очевидно, что геологическая наука в области изучения месторождений горючих ископаемых требует консолидации усилий ученых из сопредельных областей.

Более 10 лет в ИПНГ РАН проводятся сбор данных, анализ и мониторинг развития различных природных и техногенных явлений, несущих угрозы жизнедеятельности человека и нередко имеющих прямые или косвенные причинно-следственные связи (землетрясения, проседания поверхности земли, стратовулканы, грязевые вулканы, сипы газа и нефти, газогидраты, оползни, аварии и катастрофы при добыче и транспортировке УВ и др.) (рис. 2) [7–27]. В частности, землетрясения являются триггерами для извержения вулканов, которые в свою очередь сами инициируют сейсмические события (обычно небольшой магнитуды – до 3–4). Исходные и результирующие геоданные загружаются в созданную геоинформационную систему «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО» [7–27]) и постоянно дополняются. При формировании ГИС «АМО» используются результаты интерпретации данных аэрокосмического дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и наземных геолого-геофизических экспедиционных исследований, выполняемых автором и руководимым им коллективом в ИПНГ РАН, а также все доступные открытые источники информации, включая USGS и NASA.

На рис. 2 приведены примеры картографического отображения ряда разделов информации в ГИС «АМО», способствующих комплексному исследованию различных опасных природных и техногенных процессов, включая различные формы дегазации Земли и выявление причин аварий и катастроф при добыче и транспортировке УВ. Отдельные разделы ГИС «АМО» являются самыми крупными в России (сипы нефти и газа, грязевые вулканы) и даже в мире (газовые гидраты – ГГ) [7–27].

В данной работе предпринята попытка комплексного рассмотрения особенностей и проблем добычи УВ и угля в условиях криолитосферы и выявления общих закономерностей возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с высоким газонасыщением верхней части разреза (ВЧР – глубины до 500–900 м) и активными процессами природной и техногенной дегазации недр, включая мощные выбросы, самовоспламенения и взрывы газа.

Струйная дегазация и взрывы газа

Мало кого из специалистов удивляют газовые струи (по В.И. Вернадскому [3]) – сипы (пузыри) газа, нередко поднимающиеся со дна окружающих нас водоемов (озера, реки, болота, моря и океаны), в том числе и в ближнем Подмосковье. Зимой при замерзании поверхности водоемов они формируют завораживающие картины во льду. Вода и лед позволяют увидеть дегазацию Земли невооруженным глазом, при этом сипы газа существуют также на суше, но они без специального оборудования практически невидимы.

При дегазации Земли «в каждом очаге мы наблюдаем десятки и сотни струй» [3, с. 146]. Изучение генезиса выделяющегося при этом газа ведется около 250 лет, особенно на таком уникальном озере, как Байкал (J.G. Georgi, 1775; П.С. Паллас, 1788, А.М. Ломоносов, А.Л. Чекановский, 1869 и др.), на котором по данным ДЗЗ на льду видны крупные кольцевые структуры (до нескольких километров диаметром) и польньи, формируемые газогидродинамической активностью. Доказано, что газ имеет преимущественно метановый состав и наиболее активно выделяется при грязевулканических процессах и разложении ГГ, что также характерно для многих других регионов мира (см. [6–29] и др.).

Более столетия большинство ученых признает прямую зависимость грязевого вулканизма от газового воздействия: «...необходимым условием служит встреча поднимающимися газами подземного скопления воды и совместное размягчение обоими агентами вышележащих глинистых пород, которые и выдавливаются в виде грязи вместе с газами на земную поверхность»⁴; «Газы составляют самую характерную активную силу вулкана, обуславливающую все его морфологические проявления» [3, с. 146].

На тему эмиссии газа опубликованы тысячи работ, включая уникальные по полноте исследования (см. [29] и др.), при этом в последние десятилетия многие из них ориентированы на анализ генезиса и оценку объемов эмиссии газа для прогноза влияния на идущий процесс планетарного потепления климата. Не умаляя важности и достоинств этих исследований, отметим, что в данной статье мы анализируем не пузырьковую (перманентную или эпизодическую) эмиссию газа, а его мощные выбросы, несущие большие прямые угрозы жизнедеятельности человека в реальном времени.

Летом 2014 г. всё мировое сообщество было шокировано короткой видеозаписью с борта вертолета гигантского кратера (С1 в ГИС «АМО»), образовавшегося в пределах Южно-Муртинской структуры в 30 км южнее уникального по запасам Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ), разработка которого началась в 2012 г. [8–12; 25]. Внутренние и внешние размеры кратера превышали 26 и 40 м, а глубина около 50 м (рис. 3). В июле 2014 г. была

⁴ Энциклопедический словарь. СПб.: Ф.А. Брокгауз, И.А. Ефрон; 1893. Т. IXA. С. 825.



Рис. 3
Бованенковский кратер С1:
виды из вертолета и с бруствера
выброшенной взрывом породы
(фото В.И. Богоявленского
25 августа 2014 г.)

Fig. 3
Bovanenkovo Crater C1:
views from a helicopter and from
the exterior slope of the throw-
out rock (photo by V.I.
Bogoyavlensky, August 25,
2014).

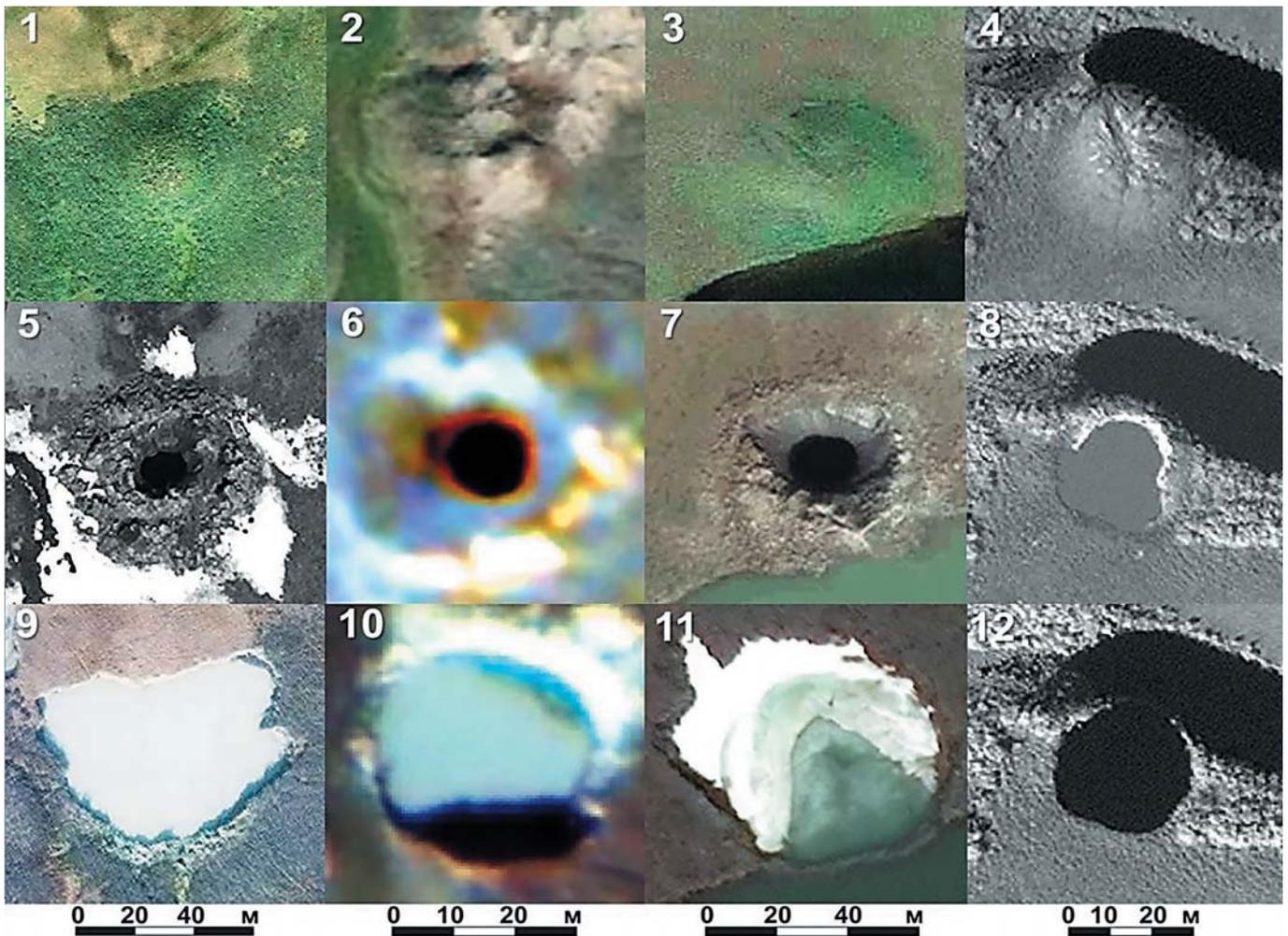


Рис. 4
Космоснимки многолетних бугров пучения (1–4), кратеров выбросов газа (5–8) и сформировавшихся кратерных термокарстовых озер (9–12) для четырех объектов исследований: С1 – Бованенковский (1 - GE-1 30.07.10, 5 - WV-1 15.06.14 и 9 - WV-2 02.10.16); С3 – Антипаютинский (2 – WV-2 05.09.11, 6 – WV-2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

Fig. 4
Satellite images of perennial permafrost mounds (1–4), gas emission craters (5–8) and formed crater thermokarst lakes (9–12) for four studied objects: С1 - Bovanenkovo (1 – GE-1 30.07.10, 5 – WV-1 15.06.14 and 9 - WV-2 02.10.16); С3 - Antipayutinsk (2 – WV-2 05.09.11, 6 – WV-2 14.11.13 and 10 – Resurs-P 31.08.15); С4 – Deryabinsk (3 – QB 01.08.09, 7 – QB 19.07.13 and 11 – WV-2 21.06.18); С12 – Erkutinsk (WV-1: 4 – 18.06.16, 8 – 25.07.18 and 12 – 21.08.19)

зафиксирована концентрация метана в воздухе на кратере С1 на самом взрывоопасном уровне 9,6–9,8% [30], но уже 25 августа содержание метана было близко фоновому [9–12].

В результате анализа данных аэрокосмического дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и проведения ряда экспедиций было обнаружено более десяти подобных объектов, включая три (С1, С2 и С9) южнее Бованенковского НГКМ (С2 и С9 на удалении всего 10 км). При этом кратер С1 расположен в 3,5 км от газопровода высокого давления Бованенково-Ухта, а обнаруженный кратер С9 – всего в 1,5 км от железной дороги ПАО «Газпром». Термоабразионное обрушение берегов и брусчаток кратеров С1 и С9 привело к тому, что по состоянию на 4 сентября 2015 г. оба кратера почти полностью заполнились водой.

Мы не будем останавливаться на ряде разнообразных гипотез образования кратеров, выдвинутых различными экспертами, а лишь отметим, что первые корректные (подтвердившиеся в дальнейших пятилетних исследованиях) модели их образования были сформулированы в 2014 г. в публикациях автора (см. [8–12] и др.). Работа пяти последующих лет была направлена на выявление и изучение ряда объектов с целью выяснения причин выбросов газа (в первую очередь природные они или техногенные?).

Благодаря уникальным возможностям ДЗЗ при анализе ретроспективных космоснимков (Landsat, Sentinel, WorldView/WV, QuickBird/QB, GeoEye/GE, Ресурс-П, Канопус и др.) было установлено, что на месте кратеров существовали МБП. Для иллюстрации приведем космоснимки четырех объектов исследований на трех стадиях (МБП до взрыва, кратеры выбросов газа и образовавшиеся термокарстовые озера) с индексацией, принятой в ГИС «АМО» (рис. 4): С1 – Бованенковский (1, 5 и 9); С3 – Антипаютинский (2, 6 и 10); С4 – Дерябинский (3, 7 и 11); С12 – Еркутинский (4, 8 и 12) (см. [7–27] и др.).

По данным ДЗЗ и ряда экспедиций на полуострове Ямал выявлено 7185 потенциально опасных многолетних бугров пучения (МБП) и 415 термокарстовых озер с кратерами выбросов газа (ТОКВГ – рис. 5) [7–27]. При этом в ряде озер количество кратеров измеряется сотнями и даже превышает тысячу. Особенно важная информация была получена в ходе экспедиций 2017–2019 гг. с применением широкого комплекса геолого-геофизических исследований криосферы и дегазации Земли: эхолокация, георадиолокация, геотермометрия, активная минисейсморазведка МОГТ 2D-3D, пассивная 3D микросейсмика, бурение неглубоких скважин и аэросъемка (вертолет и БПЛА).



Рис. 5
Термокарстовые озера с кратерами выбросов газа в северо-восточной части полуострова Ямал (снимки из вертолета В.И. Богоявленского 2015–2016 гг.)



Fig. 5
Thermokarst lakes with gas blowout craters in the north-eastern part of the Yamal Peninsula (helicopter images by V.I. Bogoyavlensky, 2015-2016)

Обобщенный анализ исследований дегазации в Арктике в 2014–2020 гг. [7–27] позволяет кратко сформулировать следующие важные для данной работы выводы и закономерности:

1. Выбросы газа образовались в местах развития МБП небольшой высоты (2–8 м), многие из которых по характеру расположения не соответствуют классическим МБП – булгуньяхам (гидролакколитам, пинго/pingo) в котловинах высохших озер (хасыреях).

2. Кратеры С1, С2 и С9 образовались в зоне экстремально-го теплового потока, выявленного ранее по данным бурения глубоких скважин.

3. Во всех наиболее хорошо обследованных/задокументированных кратерах (С1–С6, С11 и С12) существовал подземный лед с доказанной максимальной мощностью около 30 м (С1), перекрытый небольшой толщиной (от первых метров до 6–8 м в С1) суглинистых или песчаных ММП.

4. Выбросы (пневматические выхлопы – взрывы) газа имеют огромную мощность, что подтверждается большой удаленностью разлета выброшенных взрывом кусков мерзлых пород и ледогрунта (до 300–900 м) и огромными размерами отдельных кусков, измеряемыми десятками кубометров (рекордный на Сеяхинском кратере С11 – 100–150 м³) [21].

5. Представители коренного населения – очевидцы выбросов газа на объектах С3, С11 и С12, свидетельствуют о самовоспламенении и взрывах газа во всех случаях. Они наблюдались в процессе ряда природных и техногенных выбросов газа в АЗРФ и в других регионах мира. Накопленная нами информация позволяет считать одной из основных причин самовоспламенений и взрывов мощных выбросов газа возникающую электризацию пространства и электростатические разряды [21].

6. Состав и генезис газа, исследованный в разной степени только на двух объектах –С1 и С11, свидетельствует о его преимущественно метановом составе, а изотопный анализ углерода метана с объекта С11 показал его биогенный генезис ($\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ около -80%).

7. До выбросов газа в подземной части исследуемых объектов (МБП) существовали заполненные газом подземные полости (пустоты) с аномально высокими пластовыми давлениями (АВПД). Этот особенно важный вывод был сделан нами еще в 2014 г. [8–11] и подтвержден математическим моделированием в 2015 г. [12].

8. В итоге мониторинга развития кратеров с применением ДЗЗ установлено, что в течение 1–3 лет они превра-

щаются в обычные для тундры озера с небольшой (3–15 м) глубиной (см. рис. 4.9–4.12).

9. В ряде кратерных озер (С1, С3, С11 и озеро Открытие) доказана непрерывная и/или периодическая эмиссия (включая мощные выбросы) газа, свидетельствующая о вулканическом генезисе извержений (грязевой и криовулканизм) [8–27]. По ГОСТ Р 57123–2016 четко определен основной признак грязевого вулкана – «геологическое образование, постоянно или периодически извергающее грязевые массы и газы», при этом отмечается широко известная приуроченность грязевых вулканов к разломам, что также подтверждается характером распространения большинства обнаруженных ТОКВГ.

10. При статистическом анализе распространения 7185 МБП и 415 ТОКВГ установлено, что наибольшим риском выбросов газа характеризуется восточная часть полуострова Ямал, а экстремальными являются Сеяхинская, Северо-Тамбейская и Южно-Тамбейская зоны [22].

11. Аналогов мощных российских выбросов газа в арктических зонах других стран пока не найдено, что не означает их отсутствие. Первое выявление данного феномена в АЗРФ может быть объяснено двумя факторами – север Западной Сибири является самой крупной газоносной провинцией мира, при этом именно в российской Арктике ведется наиболее активное освоение природных ресурсов, что подразумевает и больший уровень проведенных исследований и накопленных знаний.

В дополнение к вышесказанному о модели МБП с газонасыщенной полостью поясним (см. выше п. 7), что она была впервые сформулирована в 2014 г. в нашей первой работе на основе первичных обследований Бованенковского кратера выброса газа С1 (ранее была аббревиатура В1) с гладким характером субвертикальных стенок кратера и рваными зонами отрыва покрывки МБП (верхняя часть – суглинистая почва, а нижняя – лёд) от окружающего массива ММП (см. рис. 3) [8, с. 14, 17]: «Наиболее вероятно, что залежь газа образовалась не в традиционном песчаном коллекторе, а в полости на месте постепенного вытаивания поребенного льда (пластового, жильного, ядра булгуньяха-гидролакколита-пинго и др.) с замещением ледового/водного пространства газом... Существование ММП привело к ... накоплению огромных объемов газа в ВЧР, в том числе и в термокарстовых полостях. Давления накопившегося газа в ряде мест оказалось достаточно для разрушения покрывающей толщи ММП, при

этом произошел выброс разрушенной части породы за счет действия пневматического или газовзрывного механизмов с образованием брусверов».

Модель МБП с газонасыщенной полостью нашла серьезные дополнительные подтверждения во многих наших последующих исследованиях, включая математическое моделирование таких объектов в 2015 г.: «непосредственно перед выбросом газа в ММП существовала заполненная им полость, а выброшенная на поверхность Земли мерзлая порода до выброса формировала только выпуклую покрывку полого объекта в виде верхнего слоя мерзлых осадков, толщина которых на объекте В1 составляет около 8 м» [12, с. 13]. Подтверждается она и подобными С1 особенностями кратеров С3, С5, С11, С12 и др. (до затопления водой), а также обнаруженными нависающими остаточными частями сводов покрывок МБП С5, С11 и С12, способных образоваться и сохраниться только при наличии полостей. Быстрый 3,5-летний рост Сеяхинского МБП (С11 – рис. 6), образовавшегося в русле реки Мюдрияха и взорвавшегося 28 июня 2017 г., говорит о мощном газодинамическом механизме его формирования с АВГД.



Рис. 6
Сеяхинский кратер выброса газа С11 на Ямале (1) и выброшенные при взрыве глыбы льда и ледогрунта (2) (фото В.И. Богоявленского 2 июля 2017 г.)

Fig. 6
Seyakha gas blowout crater С11 in Yamal (1) and blocks of ice and ice-soil thrown-out during the explosion (2) (photo by V.I. Bogoyavlensky, 2 July 2017)

Первый механизм формирования полостей в ВЧР – термокарстовый. Данный механизм объясняется широко распространенным в зонах развития ММП термокарстовым процессом, за счет которого сформировались сотни тысяч озер Арктики. Согласно всемирно известному географическому словарю издательства «Elsevier» (авторы В.М. Котляков и А.И. Комарова [31, с. 736]) под термокарстом понимается «образование просадочных, провальных форм рельефа и подземных пустот вследствие вытаива-

ния подземного льда или оттаивания мерзлого грунта» (этому определению соответствуют также [32] и «Строительные нормы и правила» СП 25.13330.2012).

Термокарстовый процесс функционирует в зонах повышенного геотермального потока, обычно возникающего в зонах распространения субвертикальных глубинных разломов и систем трещиноватости, по которым проходит циркуляция глубинных флюидов. Напомним, что обнаруженные кратеры выбросов газа С1–С6, С11 и С12 (см. выше п. 3) образовались в массивах льда, наиболее подверженного формированию подземных пустот – полостей (ледяных пещер). На рис. 7 (1) приведена фотография термокарстовой воронки, образовавшейся на месте МБП около озера Чатыр-Кель на Тянь-Шане и имеющей практически цилиндрический ствол [32], а на рис. 7 (2) – пример обнажившейся полости в массиве погребенного льда в южной части Ямала в низовьях реки Еркутаяхи [33].

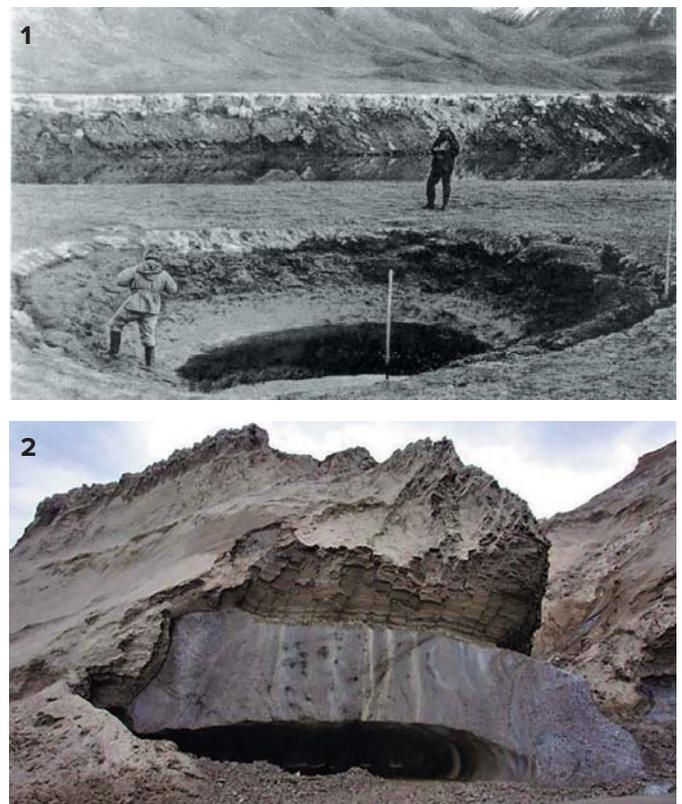


Рис. 7
Термокарстовая воронка на месте МБП на Тянь-Шане (1) [32] и обнажение погребенного льда с пустотным пространством в южной части Ямала (2) (фото С.Н. Гаврилова, 2009 [33])

Fig. 7
Thermokarst funnel on the perennial permafrost mounds site in the Tien Shan Range (1) [32] and the outcrop of the buried ice with a hollow space in the southern part of Yamal (2) (photo by S.N. Gavrillov, 2009 [33])

Второй механизм формирования полостей в ВЧР – суффозионный. Он заключается в локальном вымывании микрочастиц из растворимых горных пород потоком незамерзших межмерзлотных пластовых вод (криопеги). Действие суффозионного механизма подтверждено на многих объектах, в том числе при исследованиях карстовых процессов на северо-западе Москвы, где при образовании полости диаметром около 3,5 м в подошве юрских глин возникло гидрогеологическое окно, в которое были смыты несцементированные песчаные породы с последующим провалом поверхности земли [34, с. 63]. На формирование

полостей в ММП может одновременно влиять суффозия двух типов – механическая и химическая (за счет воздействия соленой воды на лед).

Сочетание суффозионных и термокарстовых явлений (термосуффозионный процесс) активизирует формирование полостей (пещер), проседания и провалов поверхности земли. При этом в формирующуюся полость могут обрушаться тающие ММП, до обрушения выполнявшие роль покрышки этой полости. Термосуффозионными процессами объясняется образование многочисленных провалов (воронок) диаметром до 30 м и глубиной до 15 м на поверхности земли в Центральной Якутии, в районах развития ММП мощностью до 200–400 м [35]. Возможно, что формирование полости, показанной на рис. 7 (2), происходило именно при совокупных термосуффозионных процессах.

Третий механизм формирования полостей в ВЧР – газовый. При образовании залежей газа в ВЧР в талых песчаных межмерзлотных резервуарах при экстремальных АВПД (см. ниже) возможны локальные увеличение пористости и поднятие (пучение) вышележащей толщи-покрышки из мерзлых пород с формированием на поверхности МБП. В первую очередь эти процессы могут происходить в ослабленных зонах, например, в таликах термокарстовых озер и не полностью промерзших хасыреев. При этом в отдельных пластах-резервуарах, сложенных на Ямале малокогнитивным и слабосцементированным высокопористым песчаником, могут происходить газовые разрывы сплошности (целостности) пласта с образованием заполненных газом полостей.

Наиболее ярким и однозначным примером газового разрыва пласта является применение подземных взрывов, особенно ядерных. Подземные ядерные взрывы в мирных целях применялись для создания полостей преимущественно в мощных пластах соли для хранения газа и отходов 36 раз (29% от 124 взрывов в мирных целях). Кроме того, 5 раз проводились взрывы для глушения фонтанирующих скважин, в том числе на Кумжинском НГКМ [15]. При ядерных взрывах мощное давление газа создает полость, а высокие температуры оплаивают её стенки.

Процессы закачивания в пласт воды или газа по физической сути в основном подобны, но различаются тем, что под действием давления вода практически несжимаема, а газ легко сжимается и легче распространяется в трещинно-поровом пространстве. Закачивание газа в пласты широко практикуется с различными целями, включая поддержание пластового давления (ППД), временного подземного хранения углеводородного газа (ПХГ), захоронение вредных газов (CO₂) и др. При этом вблизи нагнетательных скважин создаются локальные АВПД. Быстрое (мгновенное) закачивание в пласт воздуха/газа под большим давлением (пневматический выхлоп) по барическому эффекту подобно взрыву, создающему давления, многократно превышающие геостатические, и, следовательно, способно создать подземную полость.

Сказанное выше подтверждается проведенным нами физическим моделированием процесса закачивания воздуха в обводненную песчаную среду пористостью около 0,4, при котором первоначально произошел газовый разрыв пласта с формированием конических трещин и пучением поверхности, после чего образовалась ярко выраженная локальная полость, сохранившаяся после прекращения нагнетания воздуха. Кроме того, высокоточные интерферометрические исследования показали, что сезонные закачивание и отбор газа (лето-зима) в ПХГ приводят к ощутимым локаль-

ным подъемам и проседаниям поверхности земли [36].

Пневматические выхлопы воздуха в воду широко распространены в морской сейсморазведке для возбуждения упругих колебаний. При этом в воде создаются заполненные воздухом полости, быстро поднимающиеся к её поверхности. Давления выхлопа могут достигать 150–200 атм, и, если такой выброс воздуха организовать в малокогнитивных породах в ВЧР осадочной толщи на небольших глубинах, например, 150–200 м, возникнут локальные АВПД, многократно превышающие гидростатическое давление 15–20 атм (в 10 раз) и даже геостатическое давление порядка 34,5–46 атм (примерно в 2,3 раза). При этом может произойти газовый разрыв пласта.

Могут ли возникать в природе мощные прорывы газа, формирующие экстремальные АВПД с газовым разрывом пласта и газонасыщенные полости? Без сомнения, да! Они происходят в вулканических процессах в эруптивных каналах и обычно сопровождаются извержениями с самовоспламенениями и взрывами газа. При этом триггером начала взрывного процесса часто являются землетрясения, способствующие активизации разломов, раскрытию трещин и мощным перетокам/выбросам газа, привносящего АВПД в зоны ПД, близких гидростатическим.

Исходя из вышеизложенного необходимо вводить в употребление в науках о Земле новые термины – «газовый разрыв пласта» или «газовый разрыв осадочной толщи» (ГРОТ).

Отметим, что суффозионный и газовый механизмы формирования полостей могут действовать не только в зонах развития ММП, а практически повсеместно, где в приповерхностной толще существуют резервуары и покрышки. Заполнение полости газом может произойти за счет его миграции из нижележащих пластов и за счет выделения из растворенного в воде состояния (декомпрессия). Формирование подземных полостей способствует накапливанию в них газа с АВПД, который может поступать по газопроводящим каналам, а также выделяться из подземных газонасыщенных вод. При этом для севера ЯНАО известен высокий уровень газонасыщенности пластовых вод.

АВПД – одно из самых опасных природных явлений, часто приводящих к аварийным и катастрофическим ситуациям с выбросом газа и смесей УВ. Под термином АВПД понимается значительное (более 30%) превышение ПД ($P_n(z)$, где z – глубина) над условным гидростатическим ($P_s(z)$), при этом часто применяется понятие «коэффициент аномальности» $Ka(z) = P_n(z) / P_s(z)$ (давление считается аномальным, если $Ka(z)$ превышает 1,3).

В природе достаточно часто встречаются АВПД с Ka до 1,9–2,2. Иногда фиксируются экстремальные АВПД, которые существенно превышают геостатические/литостатические давления с $Ka > 2,3$ (см. [37; 38] и др.). Для их обозначения нет единой терминологии, используются термины «сверхлитостатические» ([37] и др.), гипер-АВПД [39], «сверхвысокие пластовые давления» (СВПД) или просто «сверхвысокие давления» (СВД) [40; 41]. Ниже для краткости изложения мы будем использовать сокращение СВД.

СВД с Ka 2,99 обнаружены при бурении на глубине 1646 м в четвертичных отложениях на полуострове Индостан в пакистанских предгорьях Гималаев (ПД 492 кг/см²), а на Северном Кавказе в Чечне на глубине 1600 м Ka достигали 2,5 и 3,13 (ПД 413 и 517 кг/см²) [42; 43]. Однако зафиксировать СВД очень сложно, так как проникновение в зону СВД чревато мощным выбросом газа, что нередко происходит вместе с буровым раствором (БР) и всей колонной буровых труб. В частности, в Каспийском регионе из аварий-

ной скважины Дашгил-42 было выброшено в воздух около 2,5 км труб [40], а из скважины Тенгиз-37 при АВПД с Ka около 2 – около 3,8 км труб.

При значительной высоте газовой залежи (h) ПД в её верхней и нижней частях (в частности, в своде и около газовой контактной – на глубинах z и $z + h$) различаются незначительно, что обусловлено многократно (около 10^2 раз) меньшей плотностью (весом) газа по сравнению с водой. Однако Ka в верхней и нижней частях залежи (Ka^a и Ka^u) могут различаться на десятки и даже сотни процентов. Причем наиболее сильны различия Ka при небольших (приповерхностных) глубинах расположения залежи газа. Это обусловлено тем, что $Ka^a(z, h) = Ka^u(z, h)(1 + h/z)$.

Согласно нашей модели образования Бованенковского кратера С1 глубиной 50 м перед выбросом газа в ММП существовала заполненная им полость, герметизированная от атмосферы выпуклой крышкой из мерзлых пород толщиной около 8 м ($z = 8$ м), т.е. $h = 50 - 8 = 42$ м. Допустим, что ПД в залежи равно гидростатическому на глубине $z + h$, т.е. $Pn(z, h) = 5$ атм и $Ka^u(z, h) = 1$. В этом случае $Ka^a(z) = 6,25$. Другими словами, в зависимости от плотности пород АВПД (СВД) в своде полости превышает геостатическое в 2,5–2,8 раза. Математическое моделирование [12] показало, что упруго-вязко-пластический характер среды позволяет крышке выдержать такое ПД без разрушения. Однако этого СВД хватает для её медленной деформации (пучения). Согласно расчетам, давления в 12,5 атм ($Ka^a(z) = 15,6$) достаточно для разрушения крышки [12]. Такое АВПД в полости легко формируется притоком газа из внутримерзлотных пластов-резервуаров (криопеги – ПД 10–25 атм, минерализация от 3–10 до 200–300 г/л, температуры от –1 до –8 °С) или из-под ММП (глубина около 300 м – ПД 30 атм).

СВД могут формироваться при наличии открытых газоподводящих каналов (газовые трубы – gas chimneys, gas pipes), которыми, в частности, являются эруптивные каналы грязевых вулканов. В самих грязевых вулканах за счет декомпрессии и выжимания газом воды и разжиженной грязи возможно образование насыщенных газом полостей. При грязевом вулканизме первоначально «начинается истечение газа по открытому каналу, ... по мере расходования газа полость вновь заполняется дисперсным материалом» [44]. Обычно «извержения начинаются со взрыва

газов в кратере, разрушения кратерной пробки и выхода на поверхность потоков полужидких грязевых брекчий...», нередко происходит самовозгорание углеводородных газов» [40, с. 47]. Об этом свидетельствуют мощные (миллионы м³/сут.) выбросы-фонтаны горящего газа высотой до 500 м на вулканах разного типа (Локбатан, Горелый и др.), включая на море (Гил в 1895 г., Гарасу в 1923 и 1977 г., Харе-Зиря в 1940 г. и др.), а также математическое моделирование [45–47]. О наличии пустот в верхних частях эруптивных каналов во многих грязевых вулканах отмечается в работе [48]: «фиксируются камеры на глубинах 70, 280–350 м и в других интервалах»; также при бурении скв. 63 на месторождении Барса-Гельмес в Туркмении описан случай «свободного падения бурового инструмента с глубины 873 м до глубины 1964 м...».

Подобные явления, видимо, происходят и в стратовулканах. Это подтверждается физическим моделированием газогидродинамических эффектов, проведенным в ИВС ДВО РАН А.Ю. Озеровым [49]. Данное моделирование механизма базальтовых взрывов с формированием газонасыщенных полостей, мигрирующих вверх по эруптивным каналам и приводящих к вулканическому взрыву, идеально иллюстрирует природные процессы грязевого вулканизма и выбросов газа, а также аварийные ситуации при бурении скважин с плотностью БР, недостаточной для компенсации АВПД газонасыщенных пластов.

С учетом вышеизложенного, согласно трем механизмам формирования полостей с газом, МБП способны сформироваться и взорваться за счет СВД газа, а не за счет криогенного процесса, характерного для формирования классических МБП типа булгунных (пинго, гидролакколит).

В работе В.П. Исаева на основе анализа фактических материалов по Патомскому объекту (конус выноса (выброса) обломков известняка 130x165 м с куполом в центре кратера около 75x80 м, 59,285° с.ш., 116,589° в.д.), обнаруженному в 1949 г. в Иркутской области в зоне существования ММП (рис. 8), сделан вывод о его вулканическом газолитокластивом генезисе за счет «прорыва горючих газов, находившихся под большим давлением, через толщу осадочных пород» [50, с. 4, 16]. Изотопный состав углерода керогена $\delta^{13}C$ свидетельствует о его глубинном генезисе (от –7,3 до –10,5‰). По разным данным, возраст вулкана оценен в 300–500 лет, при этом дендрохронологическими исследова-



Рис. 8 Патомский газолитокластивый вулкан: фотография 2008 г. В.П. Исаева (1) [50] и космоснимок WV-2 31.07.2017 (2)

Fig. 8 Patomsk gasolithoclastite volcano: 2008, photo by V.P. Isaev (1) [50] and satellite image WV-2 31.07.2017 (2)

дованиями определено, что в 1841–1842 гг. также произошло катастрофическое извержение: «осколки камней, повредившие кору деревьев и застрявшие в ней, говорят о высокой скорости и силе выброшенного материала» [50, с. 14, 43, 54]. Коренное население (якуты) называют Патомский вулкан «гнездом огненного орла», что дает основания предполагать воспламенение/взрыв газа при его выбросе. Таким образом, просматривается множество общих черт между извержениями газа под действием СВД на Патомском вулкане и исследуемых нами объектах на севере Западной Сибири.

Выбросы газа и вулканические извержения наносят сильные повреждения не только ландшафту Земли, но и несут деструкцию её недрам, создавая каналы перманентной или периодической дегазации недр. Для первичного извержения пластовых флюидов необходимы СВД, существенно превышающие геостатическое давление, создаваемое весом вышележащих пород, и позволяющие преодолеть пределы прочности и упругости горных пород, что облегчается при наличии разломов/трещин. Именно поэтому большинство вулканов приурочено к зонам разломов, что хорошо видно по цепочкам грязевых вулканов в Азербайджане и на Тамани: «Грязевые вулканы побережья Каспийского моря ... также располагаются рядами, вероятно по трещинам излома горных пород»⁵.

После первого извержения флюидов на поверхность и образования эруптивного канала последующие извержения могут возникать при меньших давлениях, чем первоначальное СВД, но оно должно быть выше геостатического давления водоглинистой толщи в эруптивном канале. Поднятие пузырей газа в водоглинистой толще приводит к уменьшению ее плотности и веса (давления) геостатического столба, что облегчает и ускоряет процесс извержения.

По материалам сейсморазведки МОГТ 2D-3D обычно прослеживаются субвертикальные структуры, соответствующие эруптивным каналам. Наглядным примером является Пульятинская кольцевая структура диаметром около 5 км (рис. 9), расположенная в Ханты-Мансийском крае вблизи Иусского нефтегазового месторождения (60,6° с.ш., 63,054° в.д.). Данный объект хорошо виден из космоса (рис. 9 (1)) и на временных разрезах куба сейсморазведки МОГТ 3D ОАО «Хантымансийскгеофизика» (2007 г.) в виде аномальной кольцевой зоны (АКЗ) – газовой трубы в форме узкого конуса, обращенного вершиной вниз (см. рис. 9 (2), (3)). Имеются разные представления о его генезисе, включая

вулканический с корнями, уходящими на большие глубины. Об этом свидетельствует наличие смеси метана и тяжелых УВ с повышенным содержанием гелия и водорода (в 40 и 39 раз) [51].

Существует множество примеров АКЗ – газовых труб, приуроченных к структурам и месторождениям на севере Западной Сибири (Русановское, Харасавэйское, Ямбургское, Юрхаровское и др.). Наиболее реалистичным механизмом формирования этих АКЗ являются прорывы пластовых флюидов под действием СВД газа. При обработке данных МОГТ и вертикального сейсмопрофилирования в зоне АКЗ подтверждается резкое (до 50%) снижение скорости, что обычно происходит в газонасыщенных зонах [39].

В приповерхностных условиях дна Мирового океана и суши за счет собственного генерационного потенциала пород ВЧР (in situ) и при миграции газа по субвертикальным каналам природного генезиса (трещины и разломы в осадочной толще) формируются залежи газа (часто с АВПД), называемые в специализированной литературе газовыми карманами (gas pockets, shallow gas). При этом газ может иметь биогенный, термокаталитический или смешанный генезис. Наличие открытых газогидродинамических каналов (газовых труб) связи разноуровневых пластов-резервуаров приводит к флюидоперетокам и формирует АВПД и даже СВД, превышающим геостатические давления. АВПД угрожают мощными выбросами газа, грязевулканическими извержениями, а при бурении и эксплуатации скважин – неконтролируемыми аварийными фонтанами с возможными катастрофическими последствиями.

Залежи газа в свободном виде (в том числе газовые карманы) обычно хорошо выделяются по данным стандартной сейсморазведки на временных разрезах МОГТ и особенно хорошо при проведении высокоразрешающей сейсморазведки [13; 20; 26]. Основными признаками газонасыщенных неоднородностей являются: повышенная амплитуда отражений, инверсия фаз отраженных волн, прогибание нижележащих осей синфазности, аномальное поглощение высоких частот колебаний, наличие зоны акустической тени и др. Залежи ГГ, как и ММП, выделяются зоной пониженного акустического импеданса (слабая выраженность сейсмических границ) и по наличию характерных сильных отражающих горизонтов BSR, соответствующих подошве ГГ, экранирующей залегающие ниже залежи свободного газа.

В ИПНГ РАН проанализированы архивные материалы региональных и локальных сейсмических работ МОГТ 2D в общем объеме около 30 тыс. пог. км, полученных в различ-

⁵ Энциклопедический словарь. СПб.: Ф.А. Брокгауз, И.А. Ефрон; 1893. Т. IXA. С. 825.

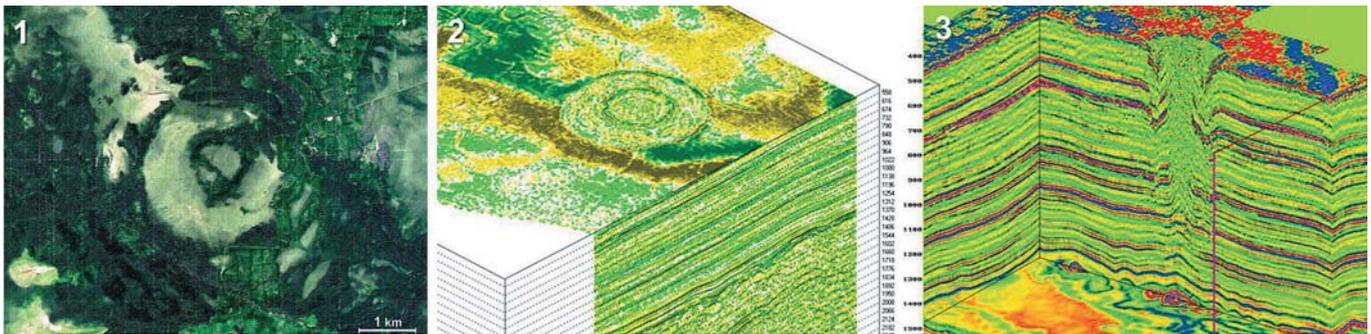


Рис. 9 Пульятинская кольцевая структура: космоснимок WV-2 9.06.2012 (1); композитные горизонтальные срезы куба сейсморазведки 3D на времени 500 мс с вертикальными разрезами в разных плоскостях (2 и 3) [51]

Fig. 9 Pulatiinskaya circular structure: satellite image WV-2 9.06.2012 (1); 3D seismic cube composite horizontal slices for 500 ms with vertical slices in different planes (2 and 3) [51]

ных регионах Мирового океана, включая моря: Охотское, Лаптевых, Берингово, Чукотское и др. [20; 26]. В результате работ установлены: высокая концентрация газонасыщенных объектов в придонных отложениях (со средним шагом 10–20 км), наличие газовых труб, МБП и покмарок (rockmarks). На рис. 10 приведен пример с одной крупной (3500 м) и четырьмя небольшими (400–800 м) неоднородностями в ВЧР, потенциально связанными с газонасыщением пластов-резервуаров на нескольких уровнях. При этом видны МБП в рельефе дна и прогибы отражающих горизонтов ниже 0,5 с (около 400 м), вызванные аномалиями пониженных скоростей распространения сейсмических волн в газонасыщенных залежах.

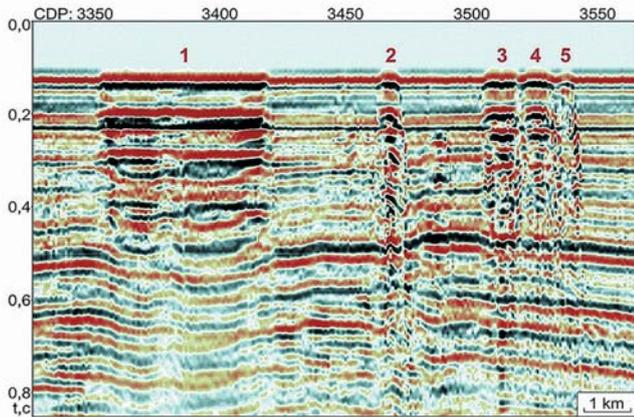


Рис. 10
Потенциально газонасыщенные объекты вблизи дна Чукотского моря: фрагмент временного разреза МОГТ L-8-80 19 (USGS)

Fig. 10
Potentially gas-saturated objects near the bottom of the Chukchee Sea: fragment of the L-8-80 19 common depth point seismic data (USGS)

Во многих случаях залежи в ВЧР содержат сотни миллионов и миллиарды кубометров газа (в сеноманских отложениях Ямала – сотни миллиардов). На шельфе Нидерландов их выявлено около 150 и на четырех из них ведется промышленная добыча газа [20]. В России таких залежей многие тысячи и их разработка может представлять значительный интерес, по крайней мере, для обеспечения локальных потребностей, особенно на суше Арктики (см. Патент 2579089 RU).

На дне Мирового океана обнаружено бесчисленное множество различных по размерам МБП и кратеров выбросов газа из отложений ВЧР (покмарки). В Северном море на месторождении Gullfaks обнаружены покмарки с частично сохранившимися сводами, покрывавшими придонные полости («fish caverns»), образовавшиеся за счет газогидродинамики [29]. Крупные кратеры формируются и при техногенных выбросах газа при бурении скважин.

Выбросы газа и смесей УВ при бурении скважин

Бурение скважин проводится с применением постоянно циркулирующего БР, охлаждающего буровой инструмент, выносящего буровой шлам и противодействующего ПД. При бурении скважин во избежание выбросов пластовых флюидов особенно в зонах АВПД применяются утяжеленные глинистые БР (добавление барита и др.). При попадании газа в БР и подъеме бурового инструмента нередко возникает снижение давления столба БР на пласт, приводящее к выбросу газа с созданием аварийной и даже катастрофической ситуации.

Добыча нефти сопровождается попутным извлечением на поверхность пластовой воды и газа. В России в настоящее время в среднем на одну тонну нефти извлекается около 9 т воды (4,5–5 млрд т в год). Однако эта вода (и даже дополнительные объемы воды) повсеместно используется для закачивания обратно в разрабатываемые резервуары для ППД и увеличения коэффициента извлечения нефти (КИН). До недавнего времени попутный нефтяной газ (ПНГ) преимущественно сжигался, а в настоящее время в основном утилизируется преимущественно для выработки электричества. Увеличивается и доля ПНГ, закачиваемого в пласты для ППД.

За рубежом закачивание ПНГ имеет очень широкое распространение. В частности, при добыче нефти на Северном склоне Аляски около 90,1–92,4% ПНГ идет на ППД, сохраняясь в природных резервуарах для будущей добычи [9; 23]. При этом КИН нередко достигает и даже превышает 60% (для абсолютного большинства отечественных месторождений это лишь мечта), а нефтяные залежи постепенно перерождаются в ПХГ. Продолжающаяся добыча нефти сопровождается многократным (десятью раз) увеличением газового фактора (ГФ) по сравнению с начальным (150–200 м³/т). В частности, в начале разработки на гигантском нефтяном месторождении Prudhoe Bay ГФ составлял 175 м³/т, а в настоящее время за счет постоянного закачивания ПНГ ГФ превышает 7 тыс. м³/т.

В ряде случаев водо- и газонагнетание в пласты-резервуары создавали опасные аварийные и даже катастрофические ситуации. В частности, 7 мая 2001 г. на месторождении Ekofisk из-за закачивания воды возникло индуцированное землетрясение магнитудой 4,1–4,4 [7]. Оно вызвало сильные сотрясения платформ и было зарегистрировано более чем 150 сейсмологических станциями мира на удалении до 2500 км.

В 2012 г. мы прогнозировали возможность возникновения наведенной сейсмичности в районах интенсивной добычи сланцевых газа и нефти в США, при которой проводятся гидроразрывы и закачивание химических растворов с пропантантами [9]. В 2014 г. от Геологической службы США (USGS) поступила информация о возникновении многочисленных землетрясений в ранее асейсмичной зоне штата Оклахома, а в 2016 г. здесь произошло землетрясение с магнитудой 5,1, повредившее ряд зданий [52].

При добыче газа закачивание воды не производится, и компенсация возникающего дефицита ПД в резервуаре осуществляется только природным путем за счет давления законтурных пластовых вод и постепенного заводнения (замещения) части изначально газонасыщенного объема залежи. Но из-за обычно практикуемого интенсивного извлечения газа природные процессы не успевают компенсировать снижение ПД в залежи, что приводит к падению дебитов скважин и неполному извлечению газа. Коэффициент извлечения газа (КИГ) обычно составляет 72–85%. Это является большой проблемой современного этапа освоения уникальных месторождений севера Западной Сибири (Медвежье, Уренгой, Ямбург и др.). Для повышения КИГ требуются специальные технологии, приводящие к многократному увеличению себестоимости добычи газа.

Нередко в погоне за максимальными дебитами УВ скважины бурятся в зонах повышенной проницаемости, связанной с разломной тектоникой и АВПД, хотя при этом возникает повышенный риск возникновения аварий. Бурение такой скважины (LUSI, 7,528° ю.ш., 112,712° в.д.) в 2006 г. на острове Ява привело к катастрофе с извержением тех-

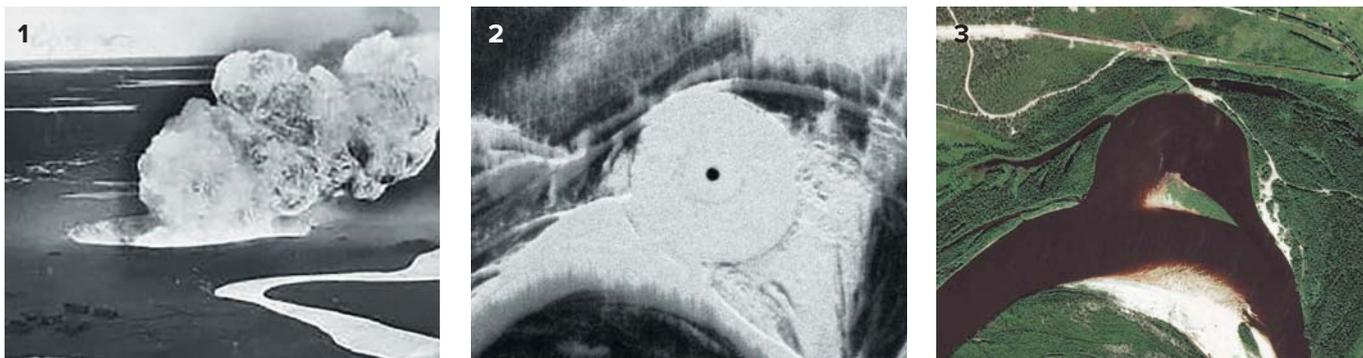


Рис. 11
Катастрофа на скважине Пурпейская-101: горение газа в начальной стадии образования кратера 11-12 февраля 1965 г. (ресурсы Интернет) (1); космоснимки места катастрофы: Corona KeyHole-4B 13.11.1968 (2) и WV-2 2.07.2016 (3)

Fig. 11
Disastrous accident at the Purpeiskaya-101 well: gas burning in the initial stage of crater formation on February 11-12, 1965. (Internet resources) (1); satellite images of the accident site: Corona KeyHole-4B 13.11.1968 (2) and WV-2 2.07.2016 (3)

ногенного грязевого вулкана с первоначальными объемами до 120–180 тыс. м³ горячей воды и грязи температурой до 97 °С [16]. Ущерб от катастрофы составил около 3 млрд долл.

В 1963 г. в Северном море при бурении скважины с СПБУ Mr. Louie на площади German Bight на глубине воды 34–35 м произошел мощный выброс газа с образованием гигантского кратера – покмарки Figge-Maar (54,168° с.ш., 6,972° в.д.) размером 300х400 м и глубиной 31 м [53]. СПБУ уцелела, так как выброс произошел в стороне от устья скважины. Последующие исследования кратера Figge-Maar показали его быстрое заполнение осадками – в 1981 и 1995 гг. глубины составляли 22 и 14 м. Это свидетельствует о том, что геологический возраст многих обнаруженных покмарок незначителен – до нескольких десятков или сотен лет.

В результате ряда экспедиций в морях Арктики (Бофорта, Печорском, Карском) доказано существование субмаринных МБП (гидролакколиты-булгуньяхи-*ringo*). В 1995 г. в Печорском море западнее полуострова Вайгач (69,97° с.ш., 57,45° в.д., глубина 50 м) ОАО «АМИГЭ» был обнаружен объект «Диапиры» с более чем 50 подводных МБП высотой 10–25 м, на которых были пробурены четыре инженерно-геологические скважины [9; 54; 55]. При бурении скважины № 481 (забой 51 м) с судна «Бавенит» на одном из МБП после прохождения 49,5 м льдистых грунтов была вскрыта зона АВПД, из которой произошел мощный выброс газа, сформировавший «котел кипения» диаметром 150–200 м. Газ создал аварийную ситуацию из-за остановки главного и вспомогательного двигателей, при этом было нарушено управление судном и оборвана колонна буровых труб. Газирование продолжалось более 10 суток с постепенным затуханием. Весьма вероятно, что эти МБП подобны исследованным на Ямале и, возможно, что они сформировались на суше до поднятия уровня Мирового океана. Выбросы газа были также при бурении в Карском море в районах прокладки газопровода в Байдарацкой губе, на выходе из Обской и Тазовской губ в основном на глубинах 11–50 м от дна.

Известны многочисленные аварийные и катастрофические техногенные выбросы газа и смесей УВ во времена СССР в АЗРФ с большой продолжительностью (месяцами и даже годами) [9; 15]. Открытие 11 февраля 1965 г. сеноманской залежи газа Губкинского НГКМ в ЯНАО при бурении скважины Пурпейская-101, заложенной на берегу реки Пяко-Пур, ознаменовалось мощным (по разным оцен-

кам 5–15 млн м³ в сутки) выбросом газа из ВЧР при поднятии буровой колонны с забоя 773 м [56]. Через полчаса фонтанирования газа и выброса больших кусков породы в 40–60 м от буровой образовались два газовых грифона. Через 2,5 ч произошло самовоспламенение газа, при этом высота горящего фонтана превысила – 150–200 м, а диаметр – 80 м (рис. 11). Через 10–15 мин буровая вышка, платформы и другое оборудование буровой установки «Уралмаш-5Д» упало в образовавшийся кратер. Диаметр техногенного термокарстового кратера достиг 500 м, после чего он соединился с рекой Пяко-Пур и заполнился водой, которая вскоре начала кипеть от высокой температуры пожара.

Фонтан на скважине Пурпейская-101 был остановлен только 28 августа 1965 г. после закачивания по специально пробуренной наклонной скважине около 35 тыс. м³ воды и 400 м³ тяжелого БР. За 6,5 мес (199 дней) фонтанирования сторело от 1 до 3 млрд м³ газа. Однако эмиссия газа из кратера продолжалась еще несколько лет, что подтверждается данными ДЗЗ. В частности, на зимнем космоснимке американского разведывательного спутника KeyHole-4B (разрешение около 2 м), выполнявшего съемку по программе Согона 13 ноября 1968 г., в центре кратера диаметром около 500 м наблюдается крупная пробоина-полынья диаметром около 35 м, образовавшаяся за счет мощного выхода (выброса) газа (рис. 11 (2)). В течение последующих десятилетий в кратере образовался остров за счет переотложения дисперсного материала речным потоком (рис. 11 (3)).

Ряд долговременных катастрофических извержений газа и смесей УВ в АЗРФ произошел в 1980-х годах на Кумжинском (1980–1987 гг.), Бованенковском (1984–1988 гг.) и Харасавэйском (1986–1987 гг.) месторождениях (см. [9; 15] и др.). По данным ДЗЗ доказано, что после ликвидации 6,5-летнего катастрофического фонтанирования смеси УВ на Кумжинском НГКМ на арктическом побережье Ненецкого автономного округа эмиссия газообразных и жидких УВ продолжается более 30 лет [15]. На космоснимках 2016 и 2017 гг. на месте катастрофы, для ликвидации которой в 1981 г. был неудачно применен ядерный взрыв, видны пробоины во льду от выбросов газа и загрязнения льда жидкими УВ. За прошедшие полвека объемы перетоков газа по заколонному и межколонному пространству из природных в формирующиеся природно-техногенные залежи и техногенной эмиссии газа в атмосферу измеряются многими десятками и, возможно, даже сотнями миллиардов кубометров.

Множество газовых карманов было вскрыто в зоне ММП на глубинах 20–130 м на Бованенковском НГКМ, при этом в отдельных случаях дебиты газа достигали 10–14 тыс. м³/сут. [57]. 17 мая 2015 г. с глубины 90 м произошел мощный выброс и возгорание газа при бурении инженерной скважины с буровой установки на базе автомобиля МАЗ ВП-15А. Высота горящего фонтана достигала 15 м, но к вечеру он самопогасился, что свидетельствует о небольших размерах газового кармана и/или возможном обрушении стенок скважины.

По данным ООО «Газпром геологоразведка» [58] в 1990-х гг. на шельфе Арктики были неконтролируемые выбросы газа. В 1990 г. в Карском море при бурении скважины Лениградская-2 с БС «Виктор Муравленко» при забое 200 м произошел выброс газа с формированием кратера и разрушением устья скважины. В Баренцевом море в 1991 г. при бурении скважины Лунинская-1 с ППБУ «Шельф-8» при забое 612 м в процессе замены БР плотностью 1,12 г/см³ на морскую воду из вскрытого газового кармана произошло неконтролируемое фонтанирование газовой смеси на высоту 40 м от стола ротора. На ликвидацию осложнения было потрачено 318 ч. В 1992 г. при бурении скважины Ледовая-2 БС «Валентин Шашин» с глубины 528 м при вскрытии газовой залежи произошел выброс газа (ликвидация последствий заняла 720 ч).

Из-за техногенных выбросов газа из придонных залежей погибли и пострадали многие сотни морских буровых платформ: ППБУ Petromar-5 (1981 г., Южно-Китайское море), СПБУ «60 лет Азербайджана» (1983 г., Каспийское море, 42,7001° с.ш., 51,667° в.д.), ППБУ West Vanguard (1985 г., Норвежское море), СПБУ Al Vaz (1989 г., шельф Нигерии), ППБУ Actinia (1993 г., Южно-Китайское море), СПБУ KS Endeavour (2012 г., шельф Нигерии) и др. [9].

Основная рекомендация при прогнозе по данным сейсморазведки наличия залежи газа в ВЧР – перенести расположение скважины в безопасную зону. В современной практике ПАО «Газпром» для снижения геологических рисков предусмотрено бурение пилотных стволов скважин диаметром 215,9 мм до глубины спуска кондуктора (ориентировочно до 600 м), при этом проводится каротаж в процессе бурения и используется запорный клапан [58].

Процесс техногенного растепления ММП в околоскважинном пространстве приводит к образованию крупных воронок проседания (провалов грунта) вокруг устьев скважин. Одна из таких воронок на Медвеьем НГКМ достигла диаметра 12 м и глубины 10 м, при этом фонтанная арматура с обсадной колонной наклонилась, что привело к обрыву шлейфа и открытому аварийному фонтанированию⁶.

За счет негерметичности цементирования заколонного пространства происходят перетоки УВ, приводящие к безвозвратной потере части продукта, ускоренному падению ПД и снижению коэффициентов извлечения газа и нефти (на Лянторском месторождении КИН = 4,5%) [59]. Особенно это сказывается при разработке глубоких залежей с АВПД. Ряд залежей имеет подпитку по субвертикальным разломам (например, Харвутинская площадь Ямбургского НГКМ), что подтверждается увеличением теплового потока. Существуют большие проблемы при эксплуатации скважин Уренгойского, Ямбургского и Заполярного месторождений, подробно описанные в работах [59; 60]. В приустьевых зонах многих скважин Ямбургского и дру-

гих месторождений постоянно наблюдаются сипы газа, мигрировавшего из различных глубинных горизонтов, что определено на основе изотопного анализа углерода метана $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ [61].

Процесс промерзания околоскважинного пространства и простаивающих скважин нередко приводит к выходу их из строя из-за смятия обсадной колонны, что неоднократно было на Мессояхском ГKM⁷.

Особую опасность несут газонасыщенные полости, существование которых доказано во многих нефтегазоносных и угольных бассейнах. Среди них отметим [62]: Кизеловский каменноугольный бассейн на Урале (визейские известняки, самые большие до 6 м в ВЧР), в восточной части Донецкого бассейна, в районе Кривого Рога (в доломитах на глубине 430 м – до 20 м), в Судетах (в кайнозойских карбонатах выявлены полости объемом до 1500 м³), в Волго-Уральской провинции (на глубине 2340 м вскрыта карстовая полость высотой 41 м), в Северном Приуралье и Пермском Прикарье (в верхнедевонских карбонатах до 5 м), в Центральной Туркмении. В результате бурения вскрыты многочисленные связанные и обособленные пещерные полости (известны 190 пещер протяженностью свыше 3 км), а длина ряда пещер достигает нескольких десятков километров [62]. Известная мексиканская карстовая пещера Ласточек (Golondrinas, 21,6° с.ш., –28,072° з.д.) имеет глубину по вертикали 333–376 м. При бурении скважин в закарстованных зонах часто возникают катастрофические поглощения БР и провалы инструмента – предвестники аварии. Широкую известность получил рукотворный «вечный огонь», горящий в кратере Дарваза диаметром около 25 м («Врата ада»), образовавшемся на месте карстового провала при бурении поисковой скважины более 60 лет назад (рис. 12).



Рис. 12 «Врата ада» – техногенный кратер Дарваза с горящим газом (фото из открытых источников)

Fig. 12 «The Gates of Hell» is a man-made Darvaza crater with burning gas (public source image)

Карстовые полости формируются за счет химического (растворение) и механического (суффозия) преобразований пород преимущественно карбонатных, сульфатных (гипсы, ангидриты) и галогенных отложений (ГОСТ 22.1.06–99). Свидетельством широкого распространения подземных полостей служит появление в последние десятилетия около трех тысяч карстовых полостей на высыхающем дне Мертвого моря, образовавшихся в соляном пласте за счет его растворения пресными грунтовыми водами. Лишь на одном фрагменте космоснимка WV-3 23 сентября 2014 г. (рис. 13) видны более 100 провалов на месте карстовых полостей, имеющие разные глубины при максимальном размере 32 м, и крупные проседания поверхности земли ди-

⁶ ТюменНИИгипрогаз. Вчера. Сегодня. Завтра. Красноярск: ИПК «Платина»; 2016. С. 74

⁷ ТюменНИИгипрогаз. Вчера. Сегодня. Завтра. Красноярск: ИПК «Платина»; 2016. С. 74.



Рис. 13
Карстовые провалы на берегу
Мертвого моря (космоснимок
WV-3 23.09.14)

Fig. 13
Sinkholes on the Dead Sea
shore (satellite image WV-3
23.09.14)

аметром свыше 100 м, фиксируемые по концентрическим разломам. Подобные полости в отложениях соли создают искусственно для ПХГ (Калининградская, Астраханская и Оренбургская области).

При работах на рудниках калийных солей Верхнекамского месторождения были многочисленные выбросы газа при бурении разведочных скважин и в шахтах нередко с его воспламенениями и взрывами. При бурении скважины №76 на глубине 150 м газ выбросил буровые колонны и воспламенился. В 1995 г. на Втором Соликамском руднике ОАО «Уралкалий» произошло газодинамическое разрушение около 3 млн м³ пород с выбросом и воспламенением около 1 млн м³ газа, вызвавшее землетрясение и проседание поверхности земли на 4,4 м [63]. Из-за затоплений и размывов солей в шахтах городов Соликамск и Березняки стали происходить многочисленные провалы, в том числе размером свыше 300x400 м и глубиной до 105 м, сопровождавшиеся выбросами газа.

Анализируя вышесказанное, можно отметить, что в зонах развития ММП формирование карстовых полостей возможно в погребенных массивах льда или в пластах оттаявшего рыхлого песчаника за счет воздействия соленых пластовых вод (криопеги – второй механизм формирования полостей в ВЧР, см. выше) [31].

Геолого-технологические особенности добычи твердых полезных ископаемых

Добыча твердых полезных ископаемых осуществляется с помощью технологий, реализуемых с применением подземных (шахты) и открытых (разрезы и карьеры) выработок, а также буровых скважин с выщелачиванием. Очевидно, что при этом в недрах происходят процессы, связанные с перераспределением сложившихся за миллионы или сотни тысяч лет горных и пластовых давлений (ГД и ПД). Естественные природные процессы (гравитация, тектонические напряжения, ПД, флюидоперетоки и др.) воздействуют на возникшие локальные участки горных выработок и на толщи окружающих и вышележащих горных пород. Результат этих воздействий зависит от физико-химических свойств горных пород (состав, консолидированность, метаморфизм, пористость, проницаемость и пр.).

Добыча угля и других твердых полезных ископаемых шахтным способом, особенно близко к поверхности земли, приводит к нарушению сплошности подземного пространства и к аномальному изменению ГД в зоне выработки, из-за которых в реальном времени или с различной времен-

ной задержкой происходит ряд негативных последствий. Среди них особенно опасными являются (с учетом ГОСТ 58150–2018⁸): динамические и газодинамические явления, включая горный удар – разрушение и выброс горной породы в шахту за счет тектонических напряжений и газодинамических явлений; выброс и взрыв рудничного газа (преимущественно метана); обрушение подземного пространства нередко с провалами отдельных участков поверхности земли; деформация (проседание) поверхности земли за счет подземного вертикального и горизонтального смещений (мульды сдвижений) пород; сейсмические события (землетрясения); нарушение гидрогеологических условий (обычно снижение уровня грунтовых вод). За счет этого часто возникают проблемы с необходимостью сноса жилого фонда из-за повреждений, так как изначально жилые дома часто строились над будущими шахтными выработками без учета всех возможных негативных последствий подземной добычи полезных ископаемых. *«Метаноопасность угольных шахт продолжает оставаться одной из наиболее острых и не решенных проблем»* [64, с. 9]. По данным ЦДУ ТЭК, в 2018 г. в России подземным (шахтным) способом было добыто около 24,6% угля, что намного меньше, чем в рекордном по объему добычи 1988 г. (46,3%).

Давление в воздушном пространстве шахтных выработок определяется только весом столба воздуха, зависящего от глубины шахты. При средней плотности воздуха 1,293 кг/м³ оно примерно в 773 раза ниже гидростатического давления и почти 1700–2000 раз ниже горного давления. С точки зрения технологии бурения нефтегазовых скважин процесс строительства шахт и подземной добычи угля и других полезных ископаемых является однозначно провоцирующим аварию. Низкое атмосферное давление в шахте способствует прямой дегазации в неё угольных толщ и вмещающей породы. Газ, находящийся в сорбированном или рассеянном состоянии, выделяется в шахту и удаляется из нее принудительной вентиляцией. Однако возможная близость к шахтам газовых залежей с АВПД или СВД создает очень опасную ситуацию, подобную описанной выше при миграции газа в приповерхностные условия с формированием залежи с экстремально высоким *Ка*. По нашему мнению, это является одной из основных причин мощных катастрофических выбросов газа в шахтах.

Особо опасные ситуации возникают при прохождении шахт вблизи газонасыщенных полостей (например, карстовых полостей и пещер), пересечении зон разломов и трещиноватости, облегчающих разгрузку близлежащих залежей газа с АВПД/СВД (см. [62] и др.). При обследованиях мест выбросов газа в шахтах нередко обнаруживаются грушевидные полости объемом до нескольких тысяч кубометров, при которых газ выбрасывался в шахту через узкую часть образовавшейся полости. По нашему мнению, такая конфигурация зоны выброса газа свидетельствует о его разгрузке из полости, существовавшей до выброса. Объемы выброшенного газа достигают 0,5–1,2 млн м³, а угля и породы – до 5–14,5 тыс. т (например, в шахте им. Ю. Гагарина ПО «Артемуголь» в Донбассе, 1968 г.).

Уникальная для понимания возможных горно-геологических условий информация была получена при проходке Арпа-Севанского тоннеля (длина 48,2 км) для пополнения озера Севан водой из реки Арпа. В зоне тектонического разлома в вулканогенных породах произошел выброс бо-

⁸ ГОСТ 58150–2018. Горное дело. Динамические явления в угольных шахтах. Термины и определения. М.: Стандартинформ; 2018.

лее 1500 т раздробленных пород и 100–250 тыс. м³ углекислого газа с образованием полости объемом около 2500 м³ и землетрясения, «ощущавшегося на расстоянии нескольких километров» [65, с. 16–17]. Объемы прорыва воды достигали 0,35–1 м³/с (в пересчете на сутки – 30,2–86,4 тыс. м³) [65, с. 16, 21]. Если доверять опубликованным цифрам, то становится очевидным существование до выброса полости газа с АВПД, так как 1500 т породы могут заполнить лишь около трети обнаруженной полости.

Кроме того, сами зоны трещиноватости (раздробленности) являются хорошим высокодебитным резервуаром (при добыче сланцевых УВ в США их называют "sweet spots" – сладкие места), из которого может произойти мощный выброс в шахту газа и породы.

Катастрофические выбросы газа в шахтах характеризуются несравнимо большим количеством погибших, чем при неконтролируемых выбросах УВ при бурении скважин. Самыми крупными катастрофами в мировой угольной индустрии признаны взрывы рудничного газа и угольной пыли 10 марта 1906 г. во французских шахтных выработках Курьере (Courrières) общей протяженностью 110 км (1099 погибших) и 26 апреля 1942 г. в китайской шахте Хонкейко (Honkeiko, 1549 погибших)⁹. За пятилетний период 2001–2005 гг. в Китае в угольных шахтах погибли 15 575 человек (3115 в год). По данным ABC News¹⁰, за XX в. в США погибло более 100 тыс. шахтеров, при этом в рекордном по количеству погибших 1907 г. – 3200. Благодаря совершенствованию горнодобывающих технологий в США удалось снизить количество смертей шахтеров в среднем до 45 в 2004–2018 гг. (из них 28 – угольщики¹⁰). Однако даже современные технологии не дают полной страховки от крупных выбросов газа. 5 апреля 2010 г. при выбросе и взрыве метана в угольной шахте Upper Big Branch, расположенной в штате Западная Вирджиния, одновременно погибли 29 горняков [66].

Детонатором взрывов рудничного газа в шахтах, как и при выбросах газа из скважин и вулканических извержениях [21], часто бывают электростатические разряды [67]. Согласно ГОСТ Р 53734.1–2014 и ГОСТ 31610.32-1–2015 даже искровой разряд с наэлектризованного человека способен легко зажечь смеси воздуха с метаном и другими углеводородными газами, а также пылевоздушную смесь¹¹.

При добыче полезных ископаемых открытым способом (53,7% от добычи РФ в 1988 г. и 75,4% – в 2018 г.) в разрезах и карьерах большие проблемы доставляют обвалы, осыпи, оползни, провоцируемые открытыми выходами грунтовых вод, приводящих к затоплению карьеров. Смещения больших объемов горных пород и взрывные работы сопровождаются ухудшением экологической обстановки и сейсмическими событиями, являющимися триггерами для новых негативных последствий. Однако рассмотрение этих проблем не является целью данной работы.

Особенности добычи полезных ископаемых в условиях криосферы

Во времена оледенений огромные территории Арктики были покрыты мощным ледовым панцирем, толщина

которого доходила до 3 км [68]. За счет отрицательных температур и давления ледового массива возникли благоприятные условия для образования ГГ. Благодаря циклу глобального потепления произошло таяние большей части ледников Арктики, освободившее от мощного пресса массивы горных пород, и поднятие уровня Мирового океана (примерно на 120 м), изменившее очертания континентальных берегов. Однако сформировавшиеся залежи ГГ в зоне ММП на больших площадях суши и в мелководных акваториях сохранились, что доказано бурением многочисленных скважин в арктических зонах Канады, США и России. Это произошло благодаря известному эффекту самоконсервации ГГ [57].

Во всех шахтах поддерживаются положительные температуры воздуха, что связано с необходимостью использования воды в системах пожаротушения, увлажнения угля при транспортировке, облегчения выработки породы, исключения искрения и др. Поэтому одной из проблем освоения месторождений твердых ископаемых в условиях ММП является её растепление, за счет чего массивы ММП деградируют и уменьшаются в объеме. Этот процесс по своей сути является техногенным термокарстом.

Изменения термобарических условий, возникающие при горных выработках, меняют экранирующие свойства ММП, что способствует миграции газа в околошахтном пространстве, а также приводят к диссоциации (разложению) ГГ. Оба явления высвобождают большие объемы газа и способны создать аварийные и катастрофические ситуации. Активные газовыделения, предположительно связанные с диссоциацией ГГ, наблюдались при оттаивании подземных выработок в шахтах золотоносных месторождений Якутии на глубинах около 100 м. ММП препятствуют выветриванию (по В.И.Вернадскому – испарению [3, с. 148]) газа из ВЧР, включая залежи угля, за счет чего сохраняется их высокая метанообильность, достигающая в угольных бассейнах Северо-Востока России 10–30 м³/т в зонах сплошного распространения ММП, по сравнению с 5–18 м³/т при островном [69, с. 7]. Весьма вероятно, что аномально высокая метаноносность залежей арктических углей в зонах ММП обусловлена не только сорбционным газом и консервацией ММП, но и наличием ГГ. Однако мощные краткосрочные выбросы газа вероятнее всего инициируются традиционными залежами газа (газовыми карманами) в высокопористых коллекторах или полостях. В таких случаях очевидным становится формирование грушевидных полостей.

Одним из феноменов выбросов газа в шахтах является образование «бешеной муки», под которой согласно ГОСТ 58150–2018 понимается «тонкодисперсная угольная пыль, образующаяся в процессе разрушения угля при внезапных выбросах угля и газа, обычно покрывающая выброшенный уголь сплошным слоем»¹².

Отметим, что за счет роста давления при диссоциации ГГ может происходить разрушение сплошности газогидратовых пород, которые способны привести к образованию суффляров или выбросу газа с размельченной разжиженной выделившейся водой (при положительной температуре) породой, в том числе углем. Это противоречит обоснованию формирования сухой «бешеной муки» при диссоциации ГГ с ростом давления на 2447 кг/см² (2,4 тыс. атм?) выше геостатического согласно [70]. Кроме того, теоретически при разложении метаногидратов может быть рост давлений

9 The world's worst coal mining disasters Mining-technology, 15 May 2014. Available at: <https://www.mining-technology.com/features/feature-world-worst-coal-mining-disasters-china/>

10 Coal Mining Steeped in History. ABC News, January 6, 2006. Available at: <https://abcnews.go.com/Primetime/Mine/story?id=1475697>

11 ГОСТ Р 53734.1–2014 (МЭК 61340-1:2012) Электростатика. Часть 1. Электростатические явления. Физические основы, прикладные задачи и методы измерения. М.: Стандартинформ; 2015; ГОСТ 31610.32-1–2015 / IEC/TS 60079-32-1:2013. Взрывоопасные среды. Электростатика. Опасные проявления. М.: Стандартинформ; 2016.

12 ГОСТ 58150–2018. Горное дело. Динамические явления в угольных шахтах. Термины и определения. М.: Стандартинформ; 2018.

примерно в три раза меньше, чем указано в работе [70]. В реальных условиях ММП выделяющиеся газ и вода, превращающаяся в лед, поднимают давление и останавливают процесс диссоциации. В этом заключается эффект самоконсервации ГГ и их существования в метастабильном состоянии в зонах ММП при дефиците геостатического давления [57].

Важный факт зафиксирован в 1972 г. при одном из многочисленных выбросов газа на Солигорских рудниках в Белоруссии [63]: при выбросе около 600 т породы вся «выработка ... была заполнена разрушенной и измельченной до пылевидного состояния породой» – подобие «бешеной муки» при угледобыче. Таким образом, подобный феномен не является специфичным для выбросов в угольных пластах. Вероятнее всего он связан с разрушением на околомолекулярном уровне, происходящим за счет мгновенной (взрывной) разгрузки породы от горных давлений и высвобождения газа от сорбционных связей.

Все известные нам угольные шахты в Арктике являются метаноопасными, включая залежи высококалорийного каменного угля Шпицбергена, на котором мощность ММП достигает 150–450 м. Из-за частых выбросов и взрывов метана с гибелью в 1926–1962 гг. 66 шахтеров (в том числе 5 ноября 1962 г. погиб 21 шахтер) была законсервирована норвежская шахта Новый-Олесун (Ny-Ålesund/New Alesund – рис. 14) – самая северная шахта в мире (78,925° с.ш., 11,922° в.д.) [71]. Добыча достигала 70–99 тыс. т (от 5 тыс. т в 1955 г. до 70–99 тыс. т в 1920-х годах и 120 тыс. т в 1961 и 1962 гг.). В расчете на один миллион тонн число погибших превышает 20 (в расчете на одного погибшего добыча составила около 40 тыс. т). Это является, видимо, самыми большими потерями шахтеров в пересчете на объемы добычи (например, на Украине это показатель составляет около 2).



Рис. 14 Норвежская шахта Новый-Олесун (REUTERS/Anna Filipova, 2015) (<https://www.currenttime.tv/a/27517355.html>)

Fig. 14 Ny-Ålesund mine in Norway (REUTERS/Anna Filipova, 2015) (<https://www.currenttime.tv/a/27517355.html>)

Все шахты АО «Воркутауголь» отнесены к самому высокому уровню газоопасности (содержание метана более 25–33 м³/т [2; 64]), при этом «сверхкатегорийными» считаются шахты с содержанием метана более 15 м³/т¹³. Для примера отметим, что в большинстве шахт США и Германии газосодержание составляет 2,8–22 м³/т [66]. Из-за взрывов метана в шахтах АО «Воркутауголь» произошли многочисленные катастрофы с гибелью людей. 20 февраля 1964 г. при взрыве на глубине 495 м в шахте №1 «Капитальная» погибло

56 шахтеров. 11 февраля 2013 г. на шахте «Воркутинская» взрыв унес жизни 19 шахтеров.

На предприятии «Воркутауголь» налажена утилизация значительных объемов метана (около 7 млн м³/мес. в 2015 г.), улавливаемого при дегазации шахт. Однако, несмотря на предпринимаемые усилия, 25 февраля 2016 г. в шахте «Северная» (67,587° с.ш., 64,071° в.д., построена в 1969 г. при реконструкции шахт №5 и 7 «Капитальная» – рис. 15) из-за взрыва метана и возникшего пожара на глубине 780 м погибли 30 из 111 работавших шахтеров¹⁴. Во время спасательных работ 25–28 февраля произошли еще два взрыва, погубившие 5 горноспасателей и одного шахтера, после чего работы приостановили. Десятки человек были травмированы. В дальнейшем в шахте произошло еще несколько взрывов, для остановки которых в период с 6 марта по 10 мая шахту затопили. Проведенное расследование показало повышенную загазованность шахты в течение 20–30 дней до взрыва и наличие многолетних системных нарушений требований промышленной безопасности.



Рис. 15 Шахта «Северная» и горные отвалы (космоснимок GE-1 11.07.2018)

Fig. 15 Severnaya Mine and rock dumps (satellite image GE-1 11.07.2018)

21–23 января 1950 г. произошла самая крупная катастрофа с серией взрывов метана в шахте №11 «Центральная» Норильского комбината МВД СССР, унесшая жизнь 50 горняков. Восстановительные работы продолжались несколько недель. Гибель угольщиков прекратилась только после 1970 г. при газификации Норильска и предприятий ГМК с почти полной остановкой добычи угля и консервацией шахт. Однако в рудных шахтах работы расширились и в них продолжились выбросы и взрывы метана. 7 июля 2017 г. при добыче медно-никелевых и сульфидных руд в шахте рудника «Заполярный» ПАО «ГМК «Норникель» (7 км к югу от г. Норильска) на глубине 490 м произошел выброс и взрыв метана. Погибли 4 и пострадали еще 3 шахтера. Ростехнадзор выявил, что взрыв произошел из-за «неработоспособного состояния стационарной системы контроля метана в горной выработке... и невыполнения мероприятий по разгазированию»¹⁵.

Для повышения безопасности шахтной добычи угля разработан ряд технологий и технических средств дегазации шахт (см. [72–74] и др.), определяемой как «извлечение и вывод взрывоопасных газов в целях снижения их содержания в шахте, угольных пластах и выработанном

¹⁴ СК заявил о завершении расследования гибели горняков на шахте «Северная». Режим доступа: <https://news.rambler.ru/fire/43026353-sk-zayavil-o-zavershenii-rassledovaniya-gibeli-gornjakov-na-shahte-severnaya/>

¹⁵ Ростехнадзор завершил расследование причин аварии на руднике «Заполярный». Режим доступа: mos.gosnadzor.ru/news/64/1890/

¹³ ПБ 05-618-03. Правила безопасности в угольных шахтах: утв. постановлением Госгортехнадзора России № 50 от 05.06.03. Российская газета. 2003, 21 июня.

пространстве до установленных допустимых норм»¹⁶. Однако считаем важным конкретизировать, что еще до строительства шахт необходимо выявление обособленных залежей газа (газовых карманов) с применением высокоразрешающей наземной сейсморазведки МОГТ и сейсмической томографии околошахтного пространства. Также целесообразен сейсмический мониторинг развития опасных явлений в районах строительства шахт, подобный применяемому на нефтегазовых месторождениях (см. [9; 72] и др.).

Применение региональных мер предотвращения газодинамических явлений, включающих упреждающую дегазацию выявленных залежей, угольных пластов и окружающего их пространства, реализуется с помощью специальных скважин, пробуренных с поверхности земли и непосредственно из горных выработок [73]. Очевидно, что эффективность дегазации угольных пластов может быть повышена с применением горизонтальных скважин с многоступенчатыми гидроразрывами пласта.

Дополнительно отметим, что дегазацию необходимо проводить при шахтной добыче любых полезных ископаемых, а также при строительстве туннелей в газообильных пластах/зонах.

Заключение и рекомендации

В зависимости от целей и технологий проникновения человека в недра Земли возникают её специфические отклики негативного характера. Все рассмотренные в данной работе явления имеют прямую или косвенную связь с газонасыщением недр Земли, а также с её природной и техногенной дегазацией, часто выражающейся в катастрофических событиях. Наличие криолитосферы привносит дополнительные сложности в освоение ресурсов полезных ископаемых и угрозы возникновения аварийных и катастрофических ситуаций.

Из-за выбросов газа в различных отраслях добычи полезных ископаемых во многих странах мира ежегодно гибнут многие сотни человек и наносится огромный экономический ущерб. Они также приводят к крупному урону региональной экосистемы и порождают большие репутационные и экономические риски для государств.

К сожалению, данные о генезисе газа (биогенный/термогенный) и результаты анализа его состояния до выброса (свободное/гидратное/сорбционное) во многих опубликованных примерах по авариям и катастрофам недоступны или очень ограничены (часто фактические материалы уничтожены взрывом и пожаром) (см. [57; 75] и др.). Очевидно, что катастрофические газодинамические события происходят в результате совокупного влияния сверхвысоких давлений и газоносности на уровнях сорбционных связей, поровой и трещинной газонасыщенности и обособленных скоплений газа (преимущественно метана). Только комплексные исследования максимального объема доступной информации о выбросах газа способны дать достоверную информацию о причинах их образования и создать наиболее надежные технологии их предотвращения.

Несмотря на десятилетия исследований, многие эксперты едины во мнении, что «изучение механизма возникновения внезапных выбросов угля и газа является современной научной задачей, актуальность которой возрастает с каждым годом» [76, с. 39].

Для определения зон формирования газовых скоплений и каналов миграции газа на поверхность Земли необходимы комплексные геофизические исследования, включая сейсмический мониторинг подземных процессов миграции газообразных флюидов, сопровождающихся микросейсмическими колебаниями. Необходимо объединение усилий и знаний специалистов различных отраслей горнодобывающей промышленности.

Автору было очень полезно проанализировать проблемы угледобычи, связанные с высоким газонасыщением угольных пластов и околошахтного пространства, на основе ранее проведенных им исследований газоносности ВЧР и катастрофических выбросов газа в арктических и субарктических регионах [6–22]. Не вызывает сомнений важность комплексного анализа природных явлений в различных отраслях горной промышленности. Интеграция результатов междисциплинарных исследований очень важна, так как на её основе могут быть даны наиболее правильные объяснения происходящих явлений. При этом автор получил более глубокое понимание природных и техногенных процессов, несущих угрозы жизнедеятельности человека, которые он попытался изложить в данной статье.

¹⁶ ГОСТ 58150–2018. Горное дело. Динамические явления в угольных шахтах. Термины и определения. М.: Стандартинформ; 2018.

Список литературы

1. Biskaborn В.К., Smith S.L., Noetzi J. et al. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*. 2019;(10):264. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
2. Воробьев Б.М.; Пучков Л.А. (ред.) *Уголь мира. Т. 3: Уголь Евразии*. М.: Горная книга; 2013. Режим доступа: <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-ugol-evrazii.pdf>
3. Вернадский В.И. О газовом обмене земной коры. *Известия Российской академии наук. Серия б.* 1912;6(2):141–162.
4. Ермаков В.И., Лебедев В.С., Немченко Н.Н. и др. Особенности формирования сеноманских газонефтяных залежей на месторождениях Западной Сибири. *Доклады АН СССР*. 1972;206(3):713–715.
5. Немченко Н.Н., Ровенская А.С., Шоелл М. Происхождение природных газов гигантских газовых залежей севера Западной Сибири. *Геология нефти и газа*. 1999;(1–2):45–56.
6. Senger K., Brugmans P., Grundvåg S.-A. et al. Petroleum, coal and research drilling onshore Svalbard: a historical perspective. *Norwegian Journal of Geology*. 2019;99(3):1–30. DOI: 10.17850/njg99-3-1.
7. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В. Особенности геологического строения и разработки нефтегазовых месторождений в регионе Северного моря. «Гронинген» и «Экофиск». *Бурение и нефть*. 2014;(4):4–8. Режим доступа: <https://burneft.ru/archive/issues/2014-04/1>
8. Богоявленский В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. *Бурение и нефть*. 2014;(9):13–18. Режим доступа: <https://burneft.ru/archive/issues/2014-09/2>

9. Богоявленский В.И. *Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов*. М.: ВЭО; 2014.
10. Богоявленский В.И. Чрезвычайные ситуации при освоении ресурсов нефти и газа в Арктике и Мировом океане. *Арктика: экология и экономика*. 2014;(4):48–59. Режим доступа: <http://arctica-ac.ru/docs/journals/16/chrezvychaynye-situacii-pri-osvoenii-resursov-nefti-i-gaza-v-arktike-i-mirovom-o.pdf>
11. Богоявленский В.И. Выбросы газа и нефти на суше и акваториях. Режим доступа: Арктики и Мирового океана. *Бурение и нефть*. 2015;(6):4–10. <https://burneft.ru/archive/issues/2015-06/4>
12. Богоявленский В.И., Гарагаш И.А. Обоснование процесса образования кратеров газового выброса в Арктике математическим моделированием. *Арктика: экология и экономика*. 2015;(3):12–17. Режим доступа: <http://arctica-ac.ru/docs/journals/19/obosnovanie-processa-obrazovaniya-kraterov-gazovogo-vybrosa-v-arktike-matematich.pdf>
13. Богоявленский В.И., Керимов В.Ю., Ольховская О.О. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Охотское море. *Нефтяное хозяйство*. 2016;(6):43–47.
14. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. Особенности геологического строения и разработки нефтяного месторождения «Уилмингтон» в Калифорнии. *Бурение и нефть*. 2016;(9):22–27. Режим доступа: <https://burneft.ru/archive/issues/2016-09/22>
15. Богоявленский В.И., Перекалин С.О., Бойчук В.М., Богоявленский В.И., Каргина Т.Н. Катастрофа на Кумжинском газоконденсатном месторождении: причины, результаты, пути устранения последствий. *Арктика: экология и экономика*. 2017;(1):32–46. Режим доступа: <http://arctica-ac.ru/docs/journals/25/katastrofa-na-kumjinskom-gazokondensatnom-mestorojdenii-prichiny-rezultaty-puti-.pdf>
16. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. Грязевулканическая катастрофа в Индонезии. *Бурение и нефть*. 2017;(11):2–11. Режим доступа: <https://burneft.ru/archive/issues/2017-11/18>
17. Богоявленский В.И. Газогидродинамика в кратерах выброса газа в Арктике. *Арктика: экология и экономика*. 2018;(1):48–55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55.
18. Богоявленский В.И. Мерзлота ошибок не прощает. *Редкие земли*. 2018;(1):6–21.
19. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В. Проблемы газовой отрасли Нидерландов: рекордный рост сейсмической активности на месторождении Гронинген. *Газовая промышленность*. 2018;(4):124–133. Режим доступа: http://neftegas.info/gasindustry/-04-2018/problemu-gazovoy-otrasli-niderlandov-rekordnyy-rost-seysmicheskoy-aktivnosti-na-mestorozhdenii-groni/?sphrase_id=36151
20. Богоявленский В.И., Казанин Г.С., Кишанков А.В. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: море Лаптевых. *Бурение и нефть*. 2018;(5):20–28. Режим доступа: <https://burneft.ru/archive/issues/2018-05/20>
21. Богоявленский В.И., Сизов О.С., Мажаров А.В., Богоявленский И.В., Никонов Р.А., Кишанков А.В., Каргина Т.Н. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал. *Арктика: экология и экономика*. 2019;(1):88–105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105.
22. Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В., Никонов Р.А., Каргина Т.Н. Дегазация Земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал. *Арктика: экология и экономика*. 2019;(4):52–68. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68.
23. Лаверов Н.П., Богоявленский В.И., Богоявленский И.В. Сейсморазведка и освоение морских месторождений нефти и газа Арктики Западного полушария. *Арктика: экология и экономика*. 2011;(3):16–27. Режим доступа: <http://www.arctica-ac.ru/docs/journals/3/seysmorazvedka-i-osvoenie-morskih-mestorojdeniy-nefti-i-gaza-arktiki-zapadnogo-p.pdf>
24. Лаверов Н.П., Богоявленский В.И., Богоявленский И.В. Фундаментальные аспекты рационального освоения ресурсов нефти и газа Арктики и шельфа России: стратегия, перспективы и проблемы. *Арктика: экология, экономика*. 2016;(2):4–13. Режим доступа: <http://www.arctica-ac.ru/docs/journals/22/fundamentalnye-aspekty-racionalnogo-osvoeniya-resursov-nefti-i-gaza-arktiki-i-sh.pdf>
25. Bogoyavlensky V. Gas Blowouts on the Yamal and Gydan Peninsulas. *GeoExPro*. 2015;12(5):74–78. Available at: <https://www.geoexpro.com/articles/2015/12/gas-blowouts-on-the-yamal-and-gydan-peninsulas>
26. Bogoyavlensky V.I., Kazanin G.S., Kishankov A.V. Gas Saturation of Shallow Deposits of the Arctic and Subarctic Seas. In: *Conference Proceedings, Marine Technologies 2019, Apr 2019*. Gelendzhik: European Association of Geoscientists & Engineers; 2019, pp. 1–7. DOI: 10.3997/2214-4609.201901808.
27. Bogoyavlensky V.I. Innovative Technologies and Results of Studying Processes of Natural and Man-Made Degassing of the Earth in the Lithosphere-Cryosphere-Hydrosphere-Atmosphere System. In: *Conference Proceedings, Third International Conference on Geology of the Caspian Sea and Adjacent Areas, Oct 2019*. Baku: European Association of Geoscientists & Engineers; 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201952015.
28. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Будагова Т.А. Экологическая безопасность и рациональное природопользование в Арктике и Мировом океане. *Бурение и нефть*. 2013;(12):10–16. Режим доступа: <https://burneft.ru/archive/issues/2013-12/2>
29. Judd A., Hovland M. *Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment*. Cambridge; 2007.
30. Лейбман М.О., Плеханов А.В. Ямальская воронка газового выброса: результаты предварительного обследования. *Холодок*. 2014;(2):9–15.
31. Kotlyakov V.M., Komarova A.I. *Elsevier's dictionary of geography*. Elsevier; 2007.
32. Алексеев В.Р., Волков Н.В., Втюрин Б.И., Втюрина Е.А., Гросвальд М.Г., Донченко Р.В., Дюнин А.К., Канаев Л.А., Котляков В.М., Кренке А.Н., Лосев К.С., Перов В.Ф., Пуриков В.Л. *Гляциологический словарь*. Л.: Гидрометеоздат; 1984.
33. Белова Н.Г. *Пластовые льды юго-западного побережья Карского моря*. М.: МАКС Пресс; 2014.
34. Аникеев А.В. *Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска*. М.: РУДН; 2017. Режим доступа: <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-provaly-i-voronki-osedaniya-v-karstovyh-rayonah-mehanizmy-obrazovaniya-progno.pdf>
35. Оленченко В.В., Гагарин Л.А., Христоворов И.И., Колесников А.Б., Ефремов В.С. Строение участка развития термосуффозионных процессов в пределах Бестяхской террасы реки Лены по геофизическим данным. *Криосфера Земли*. 2017;21(5):16–26. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-5(16-26).
36. Xuejun Q., Wei C., Dijin W., Zhaosheng N., Zhengsong C., Jie L., Xiaoqiang W., Yu L., W Tan., Guangcai F. Crustal Deformation in the Hutubi

- Underground Gas Storage Site in China Observed by GPS and InSAR Measurements. *Seismological Research Letters*. 2018;89(4):1467–1477. DOI: 10.1785/0220170221.
37. Валяев Б.М. Углеводородная дегазация Земли, геотектоника и происхождение нефти и газа (признание и развитие идей П.Н. Кропоткина). В: Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М. (ред.) *Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений (к 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кропоткина)*. М.: ГЕОС; 2011. С. 10–32.
38. Ahlbrandt T.S., Charpentier R.R., Klett T.R., Schmoker J.W., Schenk C.J., Ulmshiek G.F. *Global Resource Estimates from Total Petroleum Systems*. Tulsa: AAPG; 2005. 340 p.
39. Загоровский Ю.А. Роль флюидодинамических процессов в образовании и размещении залежей углеводородов на севере Западной Сибири: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Тюмень; 2017.
40. Холодов В.Н. О природе грязевых вулканов. *Природа*. 2002;(11):47–58.
41. Холодов В.Н. Термобарические обстановки глубин осадочно-породных бассейнов и их флюидодинамика. Сообщение 2. Сверхвысокие давления и грязевые вулканы. *Литология и полезные ископаемые*. 2019;(1):44–59. DOI: 10.31857/S0024-497X2019144-59.
42. Фенин Г.И. Аномальные пластовые давления в зонах углеводородонакопления нефтегазоносных бассейнов. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2010;5(4):1–20. Режим доступа: http://www.ngtp.ru/rub/4/46_2010.pdf
43. Fertl W.H. *Abnormal formation pressure: Implications to Exploration, Drilling, and Production of Oil and Gas Resources*. Amsterdam: Elsevier; 1976.
44. Гулиев И.С., Гусейнов Д.А. Реликты грязевых вулканов в осадочном чехле Южно-Каспийской впадины. *Литология и полезные ископаемые*. 2015;(4):350–361. DOI: 10.7868/S0024497X15040035.
45. Алиев Ад.А. Грязевые вулканы Каспийского моря. *Геология и полезные ископаемые мирового океана*. 2014;(1):33–44. Режим доступа: <http://gpimo.nas.gov.ua/sites/default/files/33-44.pdf>
46. Кулаков И.Ю. Вулкан, «надутый» газом. *Наука из первых рук*. 2014;(5):10–13. Режим доступа: <https://scfh.ru/papers/vulkan-nadutyu-gazom/>
47. Уткин И.С., Мельник О.Э. Динамика взрывной дегазации вулкана. *Труды Математического института имени В.А. Стеклова*. 2018;300:190–196. DOI: 10.1134/S0371968518010156.
48. Шнюков Е.Ф., Нетребская Е.Я. О глубинном строении эруптивного канала грязевых вулканов. *Геология и полезные ископаемые мирового океана*. 2016;14(4):54–66. Режим доступа: <http://gpimo.nas.gov.ua/sites/default/files/54-66.pdf>
49. Озеров А.Ю. Механизм базальтовых взрывов (экспериментальное моделирование). *Вулканология и сейсмология*. 2010;(5):3–19. Режим доступа: http://www.ozegov.ru/papers/2010_Ozerov_Vulcanology-Seismology.pdf
50. Исаев В.П. *Патомский феномен*. Иркутск: Изд-во ИГУ; 2014.
51. Бембель Р.М., Бембель С.Р., Мегеря В.М. Активные проявления геосолитонной дегазации Земли в сейсмологии, в геофизических и геохимических материалах. *Сейсмические технологии*. 2010;7(4):69–76. Режим доступа: ts.sbras.ru/ru/articles/10_4_069.pdf
52. Goebel, T. H. W., Weingarten, M., Chen, X., Haffener, J., Brodsky, E. E. The 2016 Mw 5.1 Fairview, Oklahoma earthquakes: Evidence for long-range poroelastic triggering at >40 km from fluid disposal wells. *Earth and Planetary Science Letters*. 2017;472:50–61. DOI: 10.1016/j.epsl.2017.05.011.
53. Thatje S., Gerdes D., Rachor E. A seafloor crater in the German Bight and its effects on the benthos. *Helgol Mar Res*. 1999;53:36–44. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FPL00012136.pdf>
54. Бондарев В.Н., Рокос С.И., Костин Д.А., Длугач А.Г., Полякова Н.А. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря. *Геология и геофизика*. 2002;43(7):587–598. Режим доступа: <http://evgengusev.narod.ru/shkarubo/bondarev-2002.html>
55. Мельников В.П., Спесивцев В.И., Куликов В.Н. О струйной дегазации углеводородов как источнике новообразований льда на шельфе Печорского моря. В: Мельников Е. С. (ред.) *Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике: материалы Междунар. конф., Пуццо, 23–26 апр. 1996 г.* Новосибирск: Наука; 1997. С. 259–269.
56. Токарев В.Д., Лидов А.П. *Эпоха Эрвье*. М.: Сибургео; 2009.
57. Якушев В.С. *Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне*. М.: ВНИИгаз; 2009.
58. Хоштария В.Н. *Опыт и методика проведения работ ООО «Газпром геологоразведка» по изучению верхней (придонной) части разреза с целью предотвращения рисков при бурении морских скважин*: [Презентация]. Режим доступа: http://www.rao-offshore.ru/netcat_files/userfiles/RAO-2017/8/Hoshtariya.pdf
59. Райкевич С.И. *Обеспечение надежности и высокой продуктивности газовых скважин*. М.: ООО «ИРЦ Газпром»; 2007.
60. Самсонов Р.О., Казак А.С., Башкин В.Н., Лесных В.В. *Системный анализ геологических рисков в газовой промышленности*. М.: Научный мир; 2007.
61. Аветов Н.Р., Краснова Е.А., Якушев В.С. Некоторые особенности приустьевых газопровывлений из интервала криолитозоны на территории Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения. *Газовая промышленность*. 2017;(8):44–47. Режим доступа: <http://neftegas.info/gasindustry/-8-2017/nekotorye-osobennosti-priustevykh-gazoprovyvleniy-iz-interval-a-kriolitozony-na-territorii-yamburgsko/>
62. Максимович Г.А., Быков В.Н. Пещеристые полости и их роль в формировании коллекторов нефти и газа. В: *Пещеры*. Пермь: ПГУ; 1972. Вып. 12-13. С. 146–155. Режим доступа: <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-v1213.pdf>
63. Лаптев Б.В. *Историография аварий при разработке соляных месторождений. Безопасность труда в промышленности*. 2011;(12):41–46. Режим доступа: <https://www.btpnadzor.ru/archive/istoriografiya-avariy-pri-razrabotke-solyanykh-mestorozhdeniy>
64. Литвинов А.Р., Коликов К.С., Ишхнели О.Г. Аварийность и травматизм на предприятиях угольной промышленности в 2010–2015 годах. *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2017;(2):6–17. Режим доступа: http://indsafe.ru/images/publ/2_2017aatac.pdf
65. Пашкин Е.М. Обобщение опыта инженерно-геологических исследований при строительстве туннелей значительной протяженности. *Инженерная геология*. 1991;(2):3–27.
66. Chow D. Why Do Coal Mines Explode? *Livescience*. April 6, 2010. Available at: <https://www.livescience.com/6298-coal-mines-explode.html>
67. Liu S., Wang T., Zhang T., Zhang J. Research on simulation of human body electrostatic discharge on detonating gas in coal mines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2013;418(conference 1):012052. DOI: 10.1088/1742-6596/418/1/012052.
68. Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quaternary Science Reviews*.

2004;23(11–13):1229–1271. DOI: 10.1016/j.quascirev.2003.12.008.

69. Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В. Геоструктурные закономерности распределения мерзлоты в углегазонасыщенных бассейнах Северо-Востока России. *Криосфера Земли*. 2014;18(1):3–11. Режим доступа: <http://www.izdatgeo.ru/pdf/krio/2014-1/3.pdf>

70. Скрицкий В.А., Сурков А.В., Соболев В.В. Причины зарождения и развития газодинамических явлений в угольных шахтах. *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2013;(2):102–108.

71. Reymert P.K. *Ny-Ålesund – the world's northernmost mining town*. Longyearbyen; 2016. Available at: https://www.sysselmannen.no/contentassets/225d990d15ff47a58050a1aa4948ed7b/ny_alesund_hefte_eng.pdf

72. Захаров В.Н. Влияние техногенных геодинамических процессов на устойчивость приконтурного массива горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(S1):159–168.

73. Малышев Ю.Н., Айруни А.Т. *Комплексная дегазация угольных шахт*. М.: Изд-во Акад. горн. наук; 1999.

74. Малышев Ю.Н., Трубецкой К.Н., Айруни А.Т. *Фундаментально-прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов*. М.: Изд-во Акад. горн. наук; 2000.

75. Макогон Ю.Ф. Газогидраты. История изучения и перспективы освоения. *Геология и полезные ископаемые мирового океана*. 2010;(2):5–21. Режим доступа: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/44846/01-makogon.pdf?sequence=1>

76. Смирнов В.Г., Дырдин В.В., Исмагилов З.Р., Ким Т.Л., Манаков А.Ю. О влиянии форм связи метана с угольной матрицей на газодинамические явления, возникающие при подземной разработке угольных пластов. *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2017;(1):34–41.

References

1. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzi J. et al. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*. 2019;(10):264. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.

2. Vorobjev B.M.; Puchkov L.A. (ed.) *World Coal. Vol. 3: Euroasian coal*. Moscow: Publishing house «Gornaya kniga»; 2013. (In Russ.) Available at: <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-ugol-evrazii.pdf>

3. Vernadskii V.I. On Gas Exchange in Earth's Crust. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya 6*. 1912;6(2):141–162. (In Russ.)

4. Ermakov V.I., Lebedev V.S., Nemchenko N.N. et al. Specific Features of Cenomanian Gas and Oil Deposits Formation in Western Siberian Fields. *Doklady AN SSSR*. 1972;206(3):713–715. (In Russ.)

5. Nemchenko N.N., Rovenskaya A.S., Shoell M. Origin of Natural Gases in Giant Gas Deposits of Northern Part of Western Siberia. *Geologiya nefti i gaza*. 1999;(1–2):45–56. (In Russ.)

6. Senger K., Brugmans P., Grundvåg S.-A. et al. Petroleum, coal and research drilling onshore Svalbard: a historical perspective. *Norwegian Journal of Geology*. 2019;99(3):1–30. DOI: 10.17850/njg99-3-1.

7. Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V. Peculiarities of geologic structure and development of oil and gas fields in North Sea's region. Groningen and Ekofisk. *Burenie i neft*. 2014;(4):4–8. (In Russ.) Available at: <https://burneft.ru/archive/issues/2014-04/1>

8. Bogoyavlensky V.I. Risk of catastrophic gas blowouts from the Arctic cryolithic zone. Yamal and Taimyr craters. *Burenie i neft*. 2014;(9):13–18. (In Russ.) Available at: <https://burneft.ru/archive/issues/2014-09/2>

9. Bogoyavlensky V.I. *Arctic and World Ocean: Current State, Prospects and Challenges of Hydrocarbon Resources Development*. Moscow: VEO; 2014. (In Russ.)

10. Bogoyavlensky V.I. Emergency Situations in Developing Oil and Gas Resources in the Arctic and the Ocean. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2014;(4):48–59. (In Russ.) Available at: <http://arctica-ac.ru/docs/journals/16/chrezvychnye-situacii-pri-osvoenii-resursov-nefti-i-gaza-v-arktike-i-mirovom-o.pdf>

11. Bogoyavlensky V.I. Oil and gas emissions on land and offshore areas of the arctic and World ocean. *Burenie i neft*. 2015;(6):4–10. (In Russ.) Available at: <https://burneft.ru/archive/issues/2015-06/4>

12. Bogoyavlensky V.I., Garagash I.A. Justification of generation of gas emission craters in the Arctic by mathematical modeling. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2015;(3):12–17. (In Russ.) Available at: <http://arctica-ac.ru/docs/journals/19/obosnovanie-processa-obrazovaniya-kraterov-gazovogo-vybrosa-v-arktike-matematich.pdf>

13. Bogoyavlensky V.I., Kerimov V.Yu., Olkhovskaya O.O. Dangerous gas-saturated objects in the world ocean: the Sea of Okhotsk. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2016;(6):43–47. (In Russ.)

14. Bogoyavlenskiy V.I., Bogoyavlenskiy I.V., Kargina T.N. Peculiarities of geologic structure and development of wilmington oil field in californiapeculiarities of geologic structure and development of Wilmington oil field in California *Burenie i neft*. 2016;(9):22–27. (In Russ.) Available at: <https://burneft.ru/archive/issues/2016-09/22>

15. Bogoyavlensky V.I., Perekalin S.O., Boichuk V.M., Bogoyavlensky I.V., Kargina T.N. Kumzhinskoye gas condensate field disaster: reasons, results and ways of eliminating the consequences. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2017;(1):32–46. (In Russ.) Available at: <http://arctica-ac.ru/docs/journals/25/katastrofa-na-kumzhinskom-gazokondensatnom-mestorozhdenii-prichiny-rezultaty-puti.pdf>

16. Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kargina T.N. Catastrophic mud volcano eruption in Indonesia *Burenie i neft*. 2017;(11):2–11. (In Russ.) Available at: <https://burneft.ru/archive/issues/2017-11/18>

17. Bogoyavlensky V.I. Gas-hydrodynamics in the Arctic craters of gas blowout. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2018;(1):48–55. (In Russ.) DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55.

18. Bogoyavlensky V.I. Permafrost does not Forgive Mistakes. *Redkie zemli*. 2018;(1):6–21. (In Russ.)

19. Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V. Problems of the Netherlands gas production: record-breaking seismic activity at the groningen field. *Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry*. 2018;(4):124–133. (In Russ.) Available at: http://neftegas.info/gasindustry/-04-2018/problemy-gazovoy-otrasli-niderlandov-rekordnyy-rost-seysmicheskoy-aktivnosti-na-mestorozhdenii-groni/?sphrase_id=36151

20. Bogoyavlensky V.I., Kazanin G.S., Kishankov A.V. Dangerous gas-saturated objects in the World ocean: the Laptev sea. *Burenie i neft*. 2018;(5):20–28. (In Russ.) Available at: <https://burneft.ru/archive/issues/2018-05/20>

21. Bogoyavlensky V.I., Sizov O.S., Mazharov A.V., Bogoyavlensky I.V., Nikonov R.A., Kishankov A.V., Kargina T.N. Earth decontamination in the Arctic: remote and field studies of the Seyakha accident gas emission on the Yamal Peninsula. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2019;(1):88–105. 88–105. (In Russ.) DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105.

22. Bogoyavlensky V.I., Sizov O.S., Bogoyavlensky I.V., Nikonov R.A., Kargina T.N. Earth Degassing in the Arctic: Comprehensive Studies of the Distribution of Frost Mounds and Thermokarst Lakes with Gas Blowout Craters on the Yamal Peninsula. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2019;(4):52–68. (In Russ.) DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68.
23. Laverov N.P., Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V. Seismic Exploration, Offshore Oil and Gas Fields Development of the Arctic Western Region. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2011;(3):16–27. (In Russ.) Available at: <http://www.arctica-ac.ru/docs/journals/3/seymorazvedka-i-osvoenie-morskih-mestorojdeniy-nefti-i-gaza-arktiki-zapadnogo-p.pdf>
24. Laverov N.P., Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V. Fundamental aspects of the rational development of oil and gas resources of the Arctic and Russian shelf: strategy, prospects and challenges. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2016;(2):4–13. (In Russ.) Available at: <http://www.arctica-ac.ru/docs/journals/22/fundamentalnye-aspekty-racionalnogo-osvoeniya-resursov-nefti-i-gaza-arktiki-i-sh.pdf>
25. Bogoyavlensky V. Gas Blowouts on the Yamal and Gydan Peninsulas. *GeoExPro*. 2015;12(5):74–78. Available at: <https://www.geoexpro.com/articles/2015/12/gas-blowouts-on-the-yamal-and-gydan-peninsulas>
26. Bogoyavlensky V.I., Kazanin G.S., Kishankov A.V. Gas Saturation of Shallow Deposits of the Arctic and Subarctic Seas. In: *Conference Proceedings, Marine Technologies 2019, Apr 2019*. Gelendzhik: European Association of Geoscientists & Engineers; 2019, pp. 1–7. DOI: 10.3997/2214-4609.201901808.
27. Bogoyavlensky V.I. Innovative Technologies and Results of Studying Processes of Natural and Man-Made Degassing of the Earth in the Lithosphere-Cryosphere-Hydrosphere-Atmosphere System. In: *Conference Proceedings, Third International Conference on Geology of the Caspian Sea and Adjacent Areas, Oct 2019*. Baku: European Association of Geoscientists & Engineers; 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201952015.
28. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Budagova T. Ecological safety and rational nature using in the Arctic and World ocean. *Burenie i neft*. 2013;(12):10–16. (In Russ.) Available at: <https://burneft.ru/archive/issues/2013-12/2>
29. Judd A., Hovland M. *Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment*. Cambridge; 2007.
30. Leibman M.O., Plekhanov A.V. Yamal Gas Emission Funnel: Preliminary Survey Results. *Kholodok*. 2014;(2):9–15. (In Russ.)
31. Kotlyakov V.M., Komarova A.I. *Elsevier's dictionary of geography*. Elsevier; 2007.
32. Alekseev V.R., Volkov N.V., Vtyurin B.I., Vtyurina E.A., Grosvald M.G., Donchenko R.V., Dyunin A.K., Kanaev L.A., Kotlyakov V.M., Krenke A.N., Losev K.S., Perov V.F., Tsurikov V.L. *Glaciological Dictionary*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1984. (In Russ.)
33. Belova N.G. *Massive ice beds of the south-western coast of the Kara Sea*. Moscow: MAKS Press; 2014. (In Russ.)
34. Anikeev A.V. *Sinkholes and Subsidence Funnels in Karst Areas: Mechanisms of Formation, Forecasting and Risk Assessment*. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia; 2017. (In Russ.) Available at: <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-provaly-i-voronki-osedaniya-v-karstovyh-rayonah-mehanizmy-obrazovaniya-progno.pdf>
35. Olenchenko V.V., Gagarin L.A., Khristoforov I.I., Kolesnikov A.B., Efremov V.S. The Structure of a Site with Thermo-Suffosion Processes within Bestyakh Terrace of the Lena River, According to Geophysical Data. *Kriosfera Zemli*. 2017;21(5):16–26. (In Russ.) DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-5(16-26).
36. Xuejun Q., Wei C., Dijin W., Zhaosheng N., Zhengsong C., Jie L., Xiaoqiang W., Yu L., W Tan., Guangcai F. Crustal Deformation in the Hutubi Underground Gas Storage Site in China Observed by GPS and InSAR Measurements. *Seismological Research Letters*. 2018;89(4):1467–1477. DOI: 10.1785/0220170221.
37. Valyaev B.M. Hydrocarbon Degassing of Earth, Geotectonics and Origin of Oil and Gas (Recognition and Development of P.N. Kropotkin's ideas). In: Dmitrievskii A.N., Valyaev B.M. (eds) *Degassing of the Earth and Genesis of Oil and Gas Fields (to the 100th Anniversary of Academician P.N. Kropotkin)*. Moscow: GEOS; 2011, pp. 10–32. (In Russ.)
38. Ahlbrandt T.S., Charpentier R.R., Klett T.R., Schmoker J.W., Schenk C.J., Ulmishek G.F. *Global Resource Estimates from Total Petroleum Systems*. Tulsa: AAPG; 2005. 340 p.
39. Zagorovskii Yu.A. Role of Fluid Dynamic Processes in the Formation and Distribution of Hydrocarbon Deposits in the North of Western Siberia: abstract of a thesis for the Degree of Candidate of Science in Geology and Mineralogy. Tyumen; 2017. (In Russ.)
40. Kholodov V.N. On Nature of Mud Volcanoes. *Priroda*. 2002;(11):47–58. (In Russ.)
41. Kholodov V.N. Thermobaric depth settings of sedimentary rock basins and their fluid dynamics: Communication 2. Superhigh pressures and mud volcanoes. *Litologiya i poleznye iskopaemye*. 2019;(1):44–59. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0024-497X2019144-59.
42. Fenin G.I. Anomalous reservoir pressure in the zones of hydrocarbon accumulation oil and gas bearing basins. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. 2010;5(4):1–20. (In Russ.) Available at: http://www.ngtp.ru/rub/4/46_2010.pdf
43. Fertl W.H. *Abnormal formation pressure: Implications to Exploration, Drilling, and Production of Oil and Gas Resources*. Amsterdam: Elsevier; 1976.
44. Guliyev I.S., Huseynov D.A. Relics of mud volcanoes in the sedimentary cover of the South Caspian Basin. *Lithology and Mineral Resources*. 2015;50(4):311–321. DOI: 10.1134/S0024490215040033.
45. Aliyev Ad.A. Mud volcanoes of the Caspian sea. *Geologiya i poleznye iskopaemye mirovogo okeana = Geology and Mineral Resources of World Ocean*. 2014;(1):33–44. (In Russ.) Available at: <http://gpimo.nas.gov.ua/sites/default/files/33-44.pdf>
46. Kulakov I.Yu. A Gas-Inflated Volcano. *Nauka iz pervykh ruk = Science First Hand*. 2014;(5):10–13. (In Russ.) Available at: <https://scfh.ru/papers/vulkan-naduty-gazom/>
47. Utkin I.S., Melnik O.E. Dynamics of Explosive Volcano Degassing. *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*. 2018;300(1):182–188. DOI: 10.1134/S0081543818010157.
48. Shnyukov E.F., Netrobskaya E.Ya. On the deep structure of the eruptive canal of mud volcanoes. *Geologiya i poleznye iskopaemye mirovogo okeana = Geology and Mineral Resources of World Ocean*. 2014;(1):33–44. (In Russ.) DOI: 10.15407/gpimo2016.04.054.
49. Ozerov A. Yu. The Mechanism of Basaltic Explosions: Experimental Modeling. *Vulkanologia i seismologia*. 2010;(5):3–19. (In Russ.) Available at: http://www.ozero.ru/papers/2010_Ozerov_Vulcanology-Seismology.pdf
50. Isaev V.P. *The Patomian Phenomenon*. Irkutsk: Irkutsk State University; 2014. (In Russ.)
51. Bembel R.M., Bembel' S.R., Megerya V.M. Active Manifestations of Geosolothic Degassing of the Earth in Seismological, Geophysical and Geochemical Materials. *Seismicheskie tekhnologii*. 2010;7(4):69–76. (In Russ.) Available at: ts.sbras.ru/ru/articles/10_4_069.pdf
52. Goebel, T. H. W., Weingarten, M., Chen, X., Haffener, J., Brodsky, E. E. The 2016 Mw 5.1 Fairview, Oklahoma earthquakes: Evidence for long-range poroelastic triggering at >40 km from fluid disposal wells. *Earth and Planetary Science Letters*. 2017;472:50–61. DOI: 10.1016/j.epsl.2017.05.011.

53. Thatje S., Gerdes D., Rachor E. A seafloor crater in the German Bight and its effects on the benthos. *Helgol Mar Res.* 1999;53:36–44. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FPL00012136.pdf>
54. Bondarev V.N., Rokos S.I., Kostin D.A., Dlugach A.G., Polyakova N.A. Underpermafrost accumulations of gas in the upper part of the sedimentary cover of the Pechora sea. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics.* 2002;43(7):587–598. (In Russ.) Available at: <http://evgengusev.narod.ru/shkarubo/bondarev-2002.html>
55. Mel'nikov V.P., Spesivtsev V.I., Kulikov V.N. On Jet Degassing of Hydrocarbons as a Source of New Ice Formations on the Pechora Sea Shelf. In: Mel'nikov E. S. (ed.) *Results of Fundamental Research into the Earth Cryosphere in the Arctic and Subarctic: Proceedings of the International Conference, Pushchino, April 23-26, 1996.* Novosibirsk: Nauka; 1997, pp. 259–269. (In Russ.)
56. Tokarev V.D., Lidov A.P. *The Age of Ervier.* Moscow: Siburgeo; 2009. (In Russ.)
57. Yakushev V.S. *Natural Gas and Gas Hydrates in Cryolithic Zone.* Moscow: VNIIGaz; 2009. (In Russ.)
58. Khoshtariya V.N. *Natural Gas and Gas Hydrates in the Cryolithic Zone. Experience and Methodology of OOO 'Gazprom Geologorazvedka' in Studying the Upper (Near-Bottom) Part of the Section to Prevent Risks in Drilling Offshore Wells: [Presentation].* (In Russ.) Available at: http://www.rao-offshore.ru/netcat_files/userfiles/RAO-2017/8/Hoshtariya.pdf
59. Raikevich S.I. *Ensuring the Reliability and High Productivity of Gas Wells.* Moscow: OOO «IRTs Gazprom»; 2007. (In Russ.)
60. Samsonov R.O., Kazak A.S., Bashkin V.N., Lesnykh V.V. *System Analysis of Geoecological Risks in Gas Industry.* Moscow: Nauchnyi mir; 2007. (In Russ.)
61. Avetov N.R., Krasnova E.A., Yakushev V.S. Certain peculiarities of wellhead gas shows from the interval of the cryolithic zone in the territory of the Yamburg oil and gas condensate field. *Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry.* 2017;(8):44–47. (In Russ.) Available at: <http://neftegas.info/gasindustry/-8-2017/nekotorye-osobennosti-priustevykh-gazoprovyavleniy-iz-interval-a-kriolitozony-na-territorii-yamburgsko/>
62. Maksimovich G.A., Bykov V.N. Cave Cavities and their Role in the Structure of Collectors of Oil and Gas. In: *Peshchery (Caves).* Perm: Gorkii University in Perm; 1972, iss. 12-13, pp. 146–155. (In Russ.) Available at: <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-v1213.pdf>
63. Laptev B.V. History of Accidents in Salt Deposit Development. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry.* 2011;(12):41–46. (In Russ.) Available at: <https://www.btpnadzor.ru/archive/istoriografiya-avariy-pri-razrabotke-solyanykh-mestorozhdeniy>
64. Litvinov A.R., Kolikov K.S., Ishkhneli O.G. Accident and traumatism at coal industry enterprises in 2010–2015. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti.* 2017;(2):6–17. (In Russ.) Available at: http://indsafe.ru/images/publ/2_2017aatac.pdf
65. Pashkin E.M. Generalization of Experience in Engineering and Geological Surveys for Construction of Large-Size Tunnels. *Inzhenernaya geologiya.* 1991;(2):3–27. (In Russ.)
66. Chow D. Why Do Coal Mines Explode? *Livescience.* April 6, 2010. Available at: <https://www.livescience.com/6298-coal-mines-explode.html>
67. Liu S., Wang T., Zhang T., Zhang J. Research on simulation of human body electrostatic discharge on detonating gas in coal mines. *Journal of Physics: Conference Series.* 2013;418(conference 1):012052. DOI: 10.1088/1742-6596/418/1/012052.
68. Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quaternary Science Reviews.* 2004;23(11–13):1229–1271. DOI: 10.1016/j.quascirev.2003.12.008.
69. Gresov A.I., Obzhairov A.I., Yatzuk A.V. Geostructural regularities of the distributions of permafrost in gas and coal-bearing basins in the North-East of Russia. *Kriosfera Zemli.* 2014;18(1):3–11. (In Russ.) Available at: <http://www.izdatgeo.ru/pdf/krio/2014-1/3.pdf>
70. Skritskii V.A., Surkov A.V., Sobolev V.V. Reasons of origination and development of gas-dynamic phenomena in coal mines. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennost.* 2013;(2):102–108. (In Russ.)
71. Reymert P.K. *Ny-Ålesund – the world's northernmost mining town.* Longyearbyen; 2016. Available at: https://www.sysselmannen.no/contentassets/225d990d15ff47a58050a1aa4948ed7b/ny_aalesund_hefte_eng.pdf
72. Zakharov V.N. Effect of Anthropogenic Geodynamic Processes on Stability of the Marginal Rock Massive. MIAB. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2011;(S1):159–168. (In Russ.)
73. Malyshev Yu.N., Airuni A.T. *Comprehensive gas drainage of underground coal mines.* Moscow: Academy of Mining; 1999. (In Russ.)
74. Malyshev Yu.N., Trubetskoi K.N., Airuni A.T. *Fundamental and applied methods for the solution of coal-bed methane problems.* Moscow: Academy of Mining; 2000. (In Russ.)
75. Makogon Yu.F. Gas Hydrates. History of Studies and Prospects of Development. *Geologiya i poleznye iskopaemye mirovogo okeana = Geology and Mineral Resources of World Ocean.* 2010;(2):5–21. (In Russ.) Available at: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/44846/01-makogon.pdf?sequence=1>
76. Smirnov V.G., Dyrdin V.V., Ismagilov Z.R., Kim T.L., Manakov A.Yu. On the influence of the forms of the connection of methane with the coal matrix on the gas dynamic phenomena arising in the underground development of coal seams. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennost.* 2017;(1):34–41. (In Russ.)

Информация об авторах

Богоявленский Василий Игоревич – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: vib@pgc.su

Information about the author

V.I. Bogoyavlensky – Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: vib@pgc.su

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.01.2020
Поступила после рецензирования: 10.02.2020
Принята к публикации: 25.02.2020

Article info

Received: 20.01.2020
Revised: 10.02.2020
Accepted: 25.02.2020