

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.345+553.981

МЕРЗЛОТА И ГАЗОГИДРАТЫ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

© 2022 г. Член-корреспондент РАН В. И. Богоявленский^{1,*}, А. В. Кишанков¹, А. Г. Казанин²

Поступило 30.06.2022 г.

После доработки 14.07.2022 г.

Принято к публикации 19.07.2022 г.

На севере мелководного Арктического шельфа Восточной Сибири (моря Лаптевых и Восточно-Сибирское) на основе материалов сейсморазведки МОГТ (метод общей глубинной точки) по 71 сейсмопрофилю общей протяженностью 15 630 км исследованы скорости распространения преломленных волн в верхней части разреза. Получена принципиально новая информация о состоянии криолитозоны шельфа и обосновано значительное уменьшение зоны возможного существования мерзлых пород и гидратов метана. На основе комплексного анализа районов деградации субаквальной мерзлоты в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском, Чукотском и Бофорта обоснована малая вероятность существенного вклада метана, выделяющегося при диссоциации залежей газогидратов, в глобальные изменения климата.

Ключевые слова: дегазация Земли, Арктический шельф Восточной Сибири (АШВС), субаквальная мерзлота, газогидраты, сейсморазведка МОГТ, преломленные волны

DOI: 10.31857/S268673972260134X

ВВЕДЕНИЕ

Многие исследователи едины во мнении, что в Арктике происходит эмиссия газа (преимущественно метана) в атмосферу вследствие деградации многолетнемерзлых пород (ММП — мерзлые породы, в которых лед цементирует частицы вмещающей породы) как на суше, так и на мелководном дне — бывшей суше, затопленной при потеплении климата в процессе постледниковой трансгрессии (поднятие уровня моря около 120 м) [1–8, 15–18, 20]. В частности, такое же объяснение было дано [5, 18] для крупной (около 220 × 80 км) и интенсивной Центрально-Лаптевской зоны сипов газа, обнаруженной в северной части мелководного шельфа моря Лаптевых в 2008–2011 гг.

Особенно большое внимание мирового научного сообщества к гигантскому Арктическому шельфу Восточной Сибири (АШВС), включающему Центрально-Лаптевскую зону сипов газа, обусловлено тем, что метан является сильным парниковым газом и увеличение его концентрации в атмосфере наряду с ростом концентрации углекислого газа способствует усилению глобаль-

ного потепления, которое в свою очередь может ускорить деградацию ММП и увеличить объемы эмиссии метана, что гипотетически может привести к “метановой катастрофе” [5, 18].

В ряде работ ([15, 17] и др.) предпринимались попытки на основе математического моделирования выполнить прогноз распространения ММП, результаты которого неоднозначны и сильно различаются (изобаты от 0 м до 20–120 м), так как сильно зависят от задаваемых физических характеристик, включая очень ограниченные данные о тепловом потоке и теплопроводности пород ВЧР (верхняя часть разреза — глубины в первые сотни метров от дна).

На предыдущем этапе в Центрально-Лаптевском районе площадью около 58 тыс. км (220 × 265 км) авторы настоящей работы исследовали сейсмические волновые поля, зарегистрированные АО “Морская арктическая геологоразведочная экспедиция” (МАГЭ) при проведении сейсморазведки МОГТ по 28 сейсмопрофилям суммарной протяженностью 5930 км [1, 2, 8]. В южной части этого района была выявлена зона существования преломленных волн от высокоскоростных горизонтов в ВЧР, отождествляемых с ММП и возможным наличием газовых гидратов (ГГ), а в северной — такие преломленные волны не были обнаружены. В итоге впервые для региона АШВС была спрогнозирована граница мерзлых и талых пород. Проведенные исследования позволили

¹ Институт проблем нефти и газа

Российской академии наук, Москва, Россия

² АО “Морская арктическая геологоразведочная экспедиция”, Мурманск, Россия

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

обосновать отсутствие ММП и связанных с ними ГГ в Центральном-Лаптевской зоне сипов газа, его глубинный генезис и прямую миграцию по тектоническим разломам [1, 2, 8]. Глубинный генезис газа из придонных осадков и сипов в открытых частях АШВС подтверждается большинством результатов анализа изотопного состава углерода метана ($\delta^{13}\text{C}$ (CH_4) от -55‰ до -37‰), а также обнаружением более тяжелых углеводородных газов (этан, пропан и др.) [11, 20].

Основной целью исследований в настоящей статье является расширение районов исследований процессов дегазации Земли [1–4, 7, 8] в регионе АШВС путем прогнозирования современного наличия ММП и ГГ в северо-западной части мелководного шельфа Восточно-Сибирского моря в комплексе с ранее полученными данными [1, 2, 8].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Для изучения распространения ММП и талых отложений (деградировавших ММП), а также ГГ применим ряд геофизических методов, включая сейсморазведку отраженными и преломленными волнами в различных диапазонах частот [2, 8, 9, 16]. Наиболее надежно пласты с повышенными скоростями распространения сейсмических волн могут быть обнаружены и исследованы по записям преломленных волн, обычно регистрируемым в первых вступлениях сейсмограмм общего пункта взрыва (ОПВ) [2, 8, 9, 11, 12, 14]. Преломленные волны от кровли слоя ММП обычно четко выделяются в первых вступлениях сейсмограмм ОПВ прямолинейными годографами, по которым определяются скорости их распространения.

Наличие преломленных волн от границ в ВЧР с повышенными скоростями указывает на присутствие ММП и/или ГГ, имеющих схожие физические свойства [9]. Подобный анализ выполнялся ранее по канадскому и американскому секторам моря Бофорта [9, 14], а также в море Лаптевых [2, 8]. Для унификации результатов согласно исследованиям на шельфе Аляски [9] минимальным значением скорости, указывающим на наличие льдонасыщенных отложений, было принято 2.3 км/с, а использованное второе граничное значение 2.8 км/с разделяет мерзлые породы по уровню льдонасыщения (цементация) на менее и более льдонасыщенные, что зависит от уровня отрицательных температур. Выделение ММП по преломленным волнам подтверждено данными исследований глубоких скважин на шельфе Аляски [9].

Использованные записи сейсморазведки МОГТ в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском по

71 сейсмопрофилю общей протяженностью 15630 км были получены научно-исследовательскими судами “Профессор Куренцов” и “Геолог Дмитрий Наливкин” МАГЭ [1–4, 8]. На обоих судах использовались сейсмостанции Sercel SEAL 428; временные твердотельные сейсмические косы Sercel SEAL Sentinel Solid длиной 8100 м (648 каналов с шагом 12.5 м).

Расчет скоростей распространения преломленных волн по сейсмограммам ОПВ проведен в программном обеспечении (ПО) RadExPro (компания “Деко-геофизика”, Россия). Картографические построения, иллюстрирующие распространение значений скоростей преломленных волн в районе исследования, выполнены в ПО ArcGIS (компания ESRI, США). Расчеты площадей прогнозного распространения талых и мерзлых пород на акваториях арктических морей выполнены в ПО ArcGIS на основе Общей батиметрической карты океанов GEBCO (<https://www.gebco.net/>).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе по временным разрезам МОГТ и сейсмограммам ОПВ (общий пункт взрыва) анализировался характер волновых полей, который показал, что отражающие и преломляющие сейсмические горизонты в ВЧР на мелководном шельфе (до изобат 120–150 м) имеют преимущественно пологое строение, близкое к горизонтально-слоистому. При этом был установлен существенно различающийся характер волновой картины в первых вступлениях сейсмограмм ОПВ (рис. 2). На всех сейсмограммах на рассматриваемых площадях в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском отчетливо видны прямые волны, распространяющиеся в водной толще со скоростью около 1.43 км/с (годограф — зеленый пунктир), отраженные и преломленные волны от ряда горизонтов в осадочной толще и кровли акустического фундамента.

Главное различие приведенных сейсмограмм ОПВ в море Лаптевых заключается в наличии или отсутствии высокоскоростных (от 2.3 до 4.0 км/с) преломленных волн от придонных горизонтов (см. рис. 2 а и 2 б). В частности, в юго-восточной части профиля LS0907 (см. рис. 2 а) видны преломленные волны от акустически жесткого горизонта (годограф — красный пунктир), отождествляемого с кровлей ММП на глубине около 20 м от дна. Данные преломленные волны распространяются до удалений 2–2.5 км от источника упругих колебаний и имеют скорость 3.3 км/с, что их значительно отличает от преломленных волн, от залегающих глубже горизонтов с граничными скоростями 2.1 и 2.4 км/с, наблюдаемых в северной части профиля LS0907 (см. рис. 2 б). Это хорошо согласуется с данными по морю Бофорта [9] и может быть объяснено более сильным затуханием

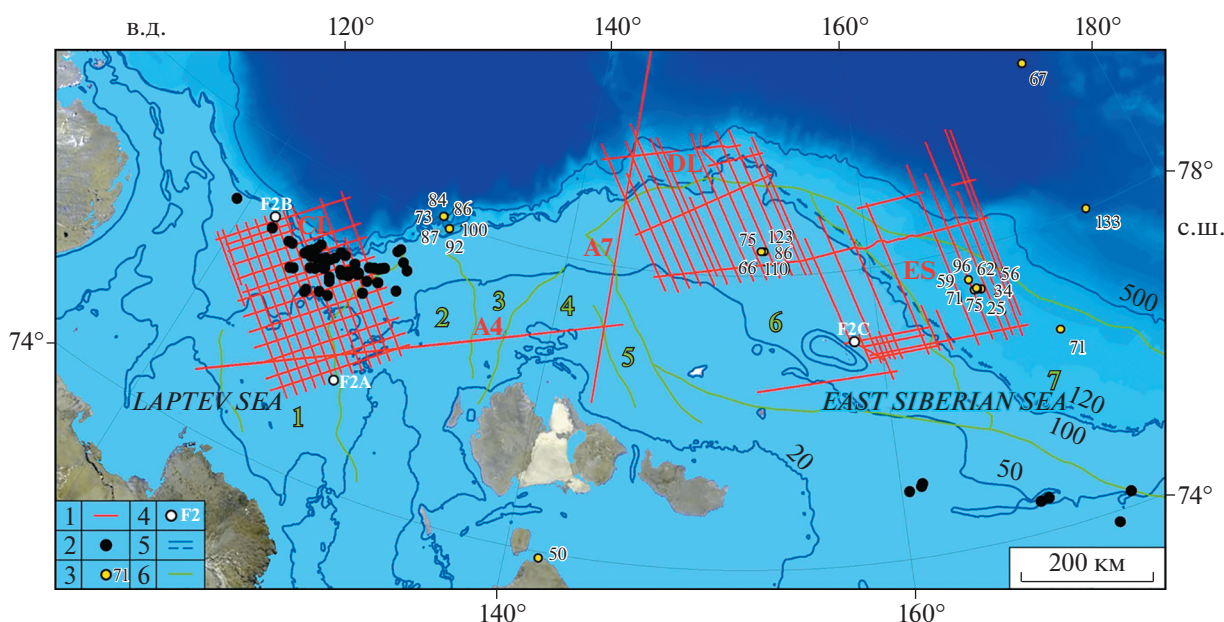


Рис. 1. Регион исследования — северная часть Арктического шельфа Восточной Сибири. Обозначения: 1 — сейсмопрофили АО “МАГЭ” в районах CL (Центрально-Лаптевский), DL (Де-Лонга) и ES (Восточно-Сибирский) [1–4, 8]; 2 — сипы газа [6, 18, 20]; 3 — тепловой поток со значениями в мВт/м² (<https://www.ihfc-iugg.org/>); 4 — сейсмограммы ОПВ на рис. 2 (а, б, в); 5 — изобаты в метрах (построены авторами на основе данных GEBCO); 6 — границы геологических структур [4]: 1 — Усть-Ленский рифт, 2 — Восточно-Лаптевское поднятие, 3 — Анисинский рифт, 4 — поднятие Котельного, 5 — Восточно-Сибирский рифт, 6 — поднятие (плато) Де-Лонга, 7 — прогиб Вилькицкого.

сейсмических волн, распространяющихся в мерзлых (льдонасыщенных) породах по сравнению с геологическими горизонтами.

Сейсмограммы ОПВ на севере Восточно-Сибирского моря существенно отличаются от предыдущих наличием преломленных волн от акустического фундамента со скоростями распространения от 5.3 до 6.7 км/с (см. рис. 2 в), который в отдельных районах залегает в ВЧР вблизи дна (например, на поднятии Де-Лонга, см. рис. 1). При этом преломленные волны от горизонтов, потенциально ассоциируемых с ММП и/или ГГ, практически повсеместно не обнаружены. Исключение составляют лишь несколько преимущественно небольших участков общей протяженностью 210 км (около 2.3% данных по Восточно-Сибирскому морю), на которых в первых вступлениях выделяются волны неясного генезиса. Они могут быть объяснены как преломленные волны от кровли островных ММП или от неоднородностей в рельефе акустического фундамента, включая изменения его физических характеристик, а также как боковые отражения.

В результате комплексного анализа 10 410 сейсмограмм ОПВ с расчетом скоростей преломленных волн в первых вступлениях для 71 сейсмопрофиля общей протяженностью 15 630 км построена схема прогноза физического состояния придонных отложений в районах исследований в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, приведенная

на рис. 3. На данной схеме цветовой кодировкой показано наличие преломленных волн от кровли ММП и/или ГГ с указанием диапазона скоростей (синий и зеленый цвета), а также отсутствие этих волн, что свидетельствует об отсутствии ММП и/или ГГ (красный цвет до изобат 120 м). Отметим, что при построении схемы рис. 3 для района CL использованы результаты, полученные нами в работах [2, 8], в которых граница талых и мерзлых пород проведена с высоким уровнем достоверности. Из-за недостатка данных в Восточно-Сибирском море эта граница была проведена условно как прогнозная по изобате 25 м на основе данных лишь по двум профилям А4 и А7 и с учетом опыта работ в море Бофорта [9]. Очевидно, что положение этой границы требует уточнений.

При построении схемы рис. 3 дополнительно были использованы данные, полученные в 1997 г. ВГР совместно с трестом СМНГ (“Севморнефтегеофизика”) с применением донных сейсмостанций (ОВН — Ocean Bottom Hydrophone systems) [11, 12]. Анализ семи сейсмограмм ОВН показал, что на пяти из них (ОВН 1–2, 1–3, 5–4, 21–2 и 21–3) в первых вступлениях видны высокоскоростные (до 3–3.5 км/с) преломленные волны, приуроченные к кровле ММП [11, 12], а на двух других (ОВН 07–1 и 19–2) они отсутствуют, что позволяет утверждать о талом состоянии придонных отложений. На рис. 3 мы это отметили,

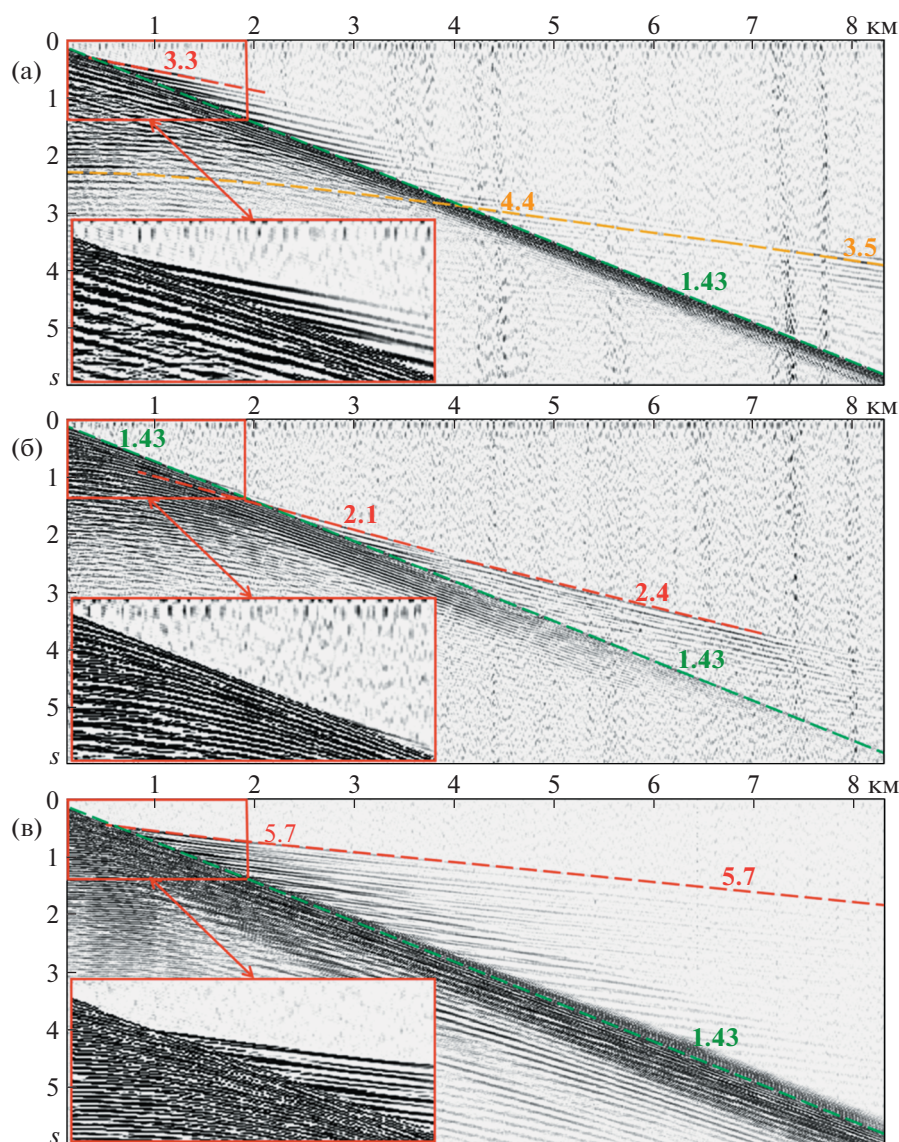


Рис. 2. Сейсмограммы ОПВ в море Лаптевых в юго-восточной (а) и северо-западной (б) частях профиля LS0907 и в Восточно-Сибирском море в западной части профиля ESS1625 (в) с увеличенными фрагментами. Положения пунктов возбуждения колебаний сейсмограмм (а, б, в) показаны на рис. 1 (F2A, F2B, F2C соответственно).

соответственно, пятью синими и двумя красными окружностями.

В итоге исследований, с учетом ряда дополнительных источников информации [8, 11, 12, 15, 18] спрогнозировано существование ММП и, возможно ГГ, начиная от береговой линии в южной части моря Лаптевых в секторе ABED (см. рис. 3) и в южной части Восточно-Сибирского моря в секторе DEHG. Соответственно, талые породы и отсутствие ГГ прогнозируются в секторах BCFE и EFIN (до изобаты 120 м). Отметим, что в зонах распространения ММП могут существовать талики, а в зонах талых пород – останцы островных ММП, что хорошо видно в районе CL (см. рис. 3 и [8]).

На основе проведенных исследований северных частей мелководного (до изобаты 120 м) шельфа морей Лаптевых и Восточно-Сибирского (см. рис. 3) с использованием батиметрических данных GEBCO и программного обеспечения ArcGIS авторами были рассчитаны площади акваторий от береговой черты до изобаты 120 м – S_{120} (ABCFED и DEFING) и до установленных и/или прогнозируемых границ между зонами существования мерзлых и талых пород – $S_{ММП}$ (ABED и DEHG). Результаты расчетов, приведенные в табл. 1, показали, что в море Лаптевых ММП сохранились на 81.2% площади центральной и восточной частей акватории, а в западной

ММП сохранились лишь на небольших частях шельфа: в Чукотском море — 24.3%, в море Бофорта на Северном Склоне Аляски — 32.3%, в канадской части моря Бофорта у континентальной суши — 36.6%.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате анализа волновых полей сейсмограмм ОПВ в исследованных частях акваторий морей Лаптевых и Восточно-Сибирского обнаружены обширные зоны отсутствия высокоскоростных преломленных волн от придонных отложений, свидетельствующие об отсутствии изменений их физических свойств за счет цементирующего влияния ММП и ГГ.

Кроме того, был дополнительно проведен анализ условий возможного существования ГГ на акваториях АШВС ранее выполненного авторами расчета эмпирических кривых стабильности ГГ в ПО CSMHYD (Hydoff) [19] для метанового состава газа исходя из среднего уровня температур придонных вод и отложений -1.5°C [8]. Согласно данным Глобальной базы данных теплового потока GHFD (Global Heat Flow Database) Международной комиссии по тепловому потоку IHFC (International Heat Flow Commission, <https://www.ihfc-iugg.org/>), районы исследований АШВС преимущественно характеризуются высокими значениями теплового потока — от 66 до 123 мВт/м² (в среднем — 92.4 мВт/м²) [8]. На основе этих данных при моделировании в ПО CSMHYD было показано [8], что в зонах отсутствия ММП на мелководном (до 120 м) шельфе Восточной Сибири отсутствует зона стабильного существования гидратов метана.

Проведенные выше расчеты (см. табл. 1) показали, что по всем рассмотренным регионам арктического шельфа (моря Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское и Бофорта) общей площадью около 1.31 млн км², ММП сохранились лишь не более чем на 566.1 тыс. км², или на 43.2% исследованной акватории. На основе этого можно утверждать, что в постгляциальный период большая часть субаквальных ММП (около 56.8%) уже деградировала. При этом согласно данным, приведенным в работах [7, 8], условия стабильности гидратов метана в районах их существования при наличии ММП после их деградации были нарушены. Это привело к диссоциации гидратов метана.

Диссоциация метаногидратов и процессы дегазации донных отложений, видимо, происходили медленно (как и деградация ММП) и без каких-либо мощных продолжительных выбросов газа, способных оказать существенное влияние на глобальное содержание метана в атмосфере и климатические процессы, происходящие на Земле. Это согласуется с результатами исследований концентраций метана в атмосфере на временных

интервалах до 420–800 тыс. лет, выполненных при анализе антарктического ледового керна из российской скважины на станции Vostok и по Европейскому проекту бурения льда в Антарктиде EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) на Куполе С (Dome C) ([13] и др.). Из этих результатов следует, что концентрация метана в атмосфере в доиндустриальное время при изменениях климата во время ряда ледниковых периодов никогда не выходила из диапазона 320–800 ppb, что примерно в 2.4–6 раз меньше, чем 1908.5 ppb, зафиксированное в феврале 2022 г. Национальным управлением океанических и атмосферных исследований NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/). В связи с этим представляется маловероятным, что и в дальнейшем диссоциация залежей газогидратов при деградации субаквальных ММП в Арктике сможет внести существенный вклад в изменения климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На севере мелководного Арктического шельфа Восточной Сибири (моря Лаптевых и Восточно-Сибирское) на основе материалов сейсморазведки МОГТ по 71 сеймопрофилю общей протяженностью 15 630 км впервые исследованы скорости распространения преломленных волн в верхней части разреза. Получена принципиально новая информация о физическом состоянии криолитозоны шельфа, при этом обосновано значительное уменьшение зоны возможного существования мерзлых пород и гидратов метана.

На основе комплексного анализа исследованных районов деградации субаквальной мерзлоты в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском, Чукотском и Бофорта (до изобаты 120 м) сделан вывод, что в постгляциальный период ее большая часть (суммарно около 57%) уже деградировала. При этом метаногидраты, образовавшиеся в ледниковый период в низменных частях суши в условиях низкого уровня Мирового океана, видимо, подверглись постепенной диссоциации без каких-либо интенсивных продолжительных выбросов газа, способных оказать катастрофическое влияние на глобальное содержание метана в атмосфере и климатические процессы, происходящие на Земле. В итоге мы прогнозируем малую вероятность ключевого вклада метана, выделяющегося при диссоциации залежей газогидратов из-за деградации оставшейся субаквальной мерзлоты в климатические изменения.

Проведенные исследования необходимо продолжить и расширить с привлечением дополнительных данных сейсморазведки МОГТ и других геолого-геофизических исследований. Мы предполагаем, что это не только уточнит положение границы существования субаквальной мерзлоты

и газогидратов, но и приведет к существенному дополнительному расширению зоны их отсутствия на шельфе Восточной Сибири и Чукотского полуострова. Это позволит уточнить процессы дегазации донных отложений, скорректировать оценки объемов ресурсов газа в газогидратных залежах и потенциального влияния объемов эмиссии газа в атмосферу при диссоциации газогидратов на глобальные изменения климата. Мы прогнозируем их значительные коррективы в меньшую сторону.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны анонимным рецензентам за полезные замечания, позволившие улучшить статью.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богоявленский В.И., Казанин А.Г., Кишанков А.В., Казанин Г.А. Дегазация Земли в Арктике: комплексный анализ факторов мощной эмиссии газа в море Лаптевых // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 2. С. 178–194.
2. Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г. Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 1. С. 83–89.
3. Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г. Неоднородности верхней части разреза осадочной толщи Восточно-Сибирского моря: залежи газа и следы ледовой экзарации. // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 505. № 1. С. 5–10.
4. Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г., Казанин Г.А. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Восточно-Сибирское море // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12. № 2. С. 158–171.
5. Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Шахова Н.Е. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина “метановой катастрофы”: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // ДАН. 2012. Т. 446. № 3. С. 330–335.
6. Baranov B., Galkin S., Vedenin A., et al. Methane seeps on the outer shelf of the Laptev Sea: Characteristic features, structural control, and benthic fauna // Geo-Marine Letters. 2020. V. 40. P. 541–557.
7. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlensky I. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas // Geosciences. 2018. No 8. 453. P. 1–17.
8. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A., Kazanin G. Distribution of permafrost and gas hydrates in relation to intensive gas emission in the central part of the Laptev Sea (Russian Arctic) // Marine and Petroleum Geology, 5 January 2022. P. 1–15. 105527.
9. Brothers L.L., Hart P.E., Ruppel C.D. Minimum distribution of subsea ice-bearing permafrost on the US Beaufort Sea continental shelf // Geop. Res. Let. 2012. V. 39. № 15. P. 1–6.
10. Collett T.S., Lee M.W., Avena W.F., et al. Permafrost-associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope // Marine and Petroleum Geology. 2011. V. 28. № 2. P. 279–294.
11. Cramer B., Franke D. Indications for an active petroleum system in the Laptev Sea, NE Siberia // J. of Petroleum Geology. 2005. V. 28. № 4. P. 369–384.
12. Franke D., Hinz K., Oncken O. The Laptev Sea Rift // Marine and Petroleum Geology. 2001. V. 18. № 10. P. 1083–1127.
13. Loulergue L., Schilt A., Spahni R., et al. Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the past 800 000 years // Nature. 2008. V. 453. P. 383–386.
14. Marine Science Atlas of the Beaufort Sea. Geology and Geophysics / Geological Survey of Canada, Miscellaneous Report 40. 1987. 43 p.
15. Matveeva T.V., Kaminsky V.D., Semenova A.A., Shchur N.A. Factors affecting the formation and evolution of permafrost and stability zone of gas hydrates: case study of the Laptev Sea // Geosciences. 2020. V. 10. 504.
16. Rekant P., Bauch H.A., Schwenk T., et al. Evolution of subsea permafrost landscapes in Arctic Siberia since the Late Pleistocene: a synoptic insight from acoustic data of the Laptev Sea // Arktos. 2015. 1: 11. 15 p.
17. Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Gavrilov A.V., et al. Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas // Geo-marine letters. 2005. V. 25. № 2–3. P. 167–182.
18. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice. Philosophical Transactions of the Royal Society A // Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2015. V. 373, 20140451.
19. Sloan E.D. Offshore Hydrate Engineering Handbook; Center for Hydrate Research / Colorado School of Mines: Golden, CO, USA, 1998. 255 p.
20. Steinbach J., Holmstrand H., Shcherbakova K., et al. Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf // PNAS. 2021. V. 118. № 10. e2019672118, P. 1–9.

PERMAFROST AND GAS HYDRATES ON THE EAST SIBERIAN ARCTIC SHELF

Corresponding Member of the RAS **V. I. Bogoyavlensky^{a, #}, A. V. Kishankov^a, and A. G. Kazanin^b**

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

^b *Marine Arctic Geological Expedition (MAGE), Murmansk, Russian Federation*

[#] *E-mail: geo.ecology17@gmail.com*

In the north of the shallow East Siberian Arctic Shelf (the Laptev and East Siberian seas), based on CDP (common depth point) seismic data for 71 lines with total length of 15630 km, velocities of refracted waves propagation in the upper part of the section were studied. Fundamentally new information was obtained on the state of the shelf permafrost and significant decrease of the zone of possible occurrence of frozen ground and methane hydrates was substantiated. Based on the comprehensive analysis of areas of subsea frozen ground degradation in the Laptev, East Siberian, Chukchi and Beaufort seas, the low probability of a significant contribution of methane, released due to gas hydrates dissociation, to global climate change was substantiated.

Keywords: Earth degassing, East Siberian Arctic Shelf, subsea frozen ground, gas hydrates, CDP seismic survey, refracted waves