

ОПАСНЫЕ ГАЗОНАСЫЩЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ, ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА (РОССИЯ) И АЛЯСКИ (США)

В. И. Богоявленский, А. В. Кишанков

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

Для цитирования

Богоявленский В. И., Кишанков А. В. Опасные газонасыщенные объекты на арктическом шельфе Восточной Сибири, Дальнего Востока (Россия) и Аляски (США) // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 4. — С. 478—487. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-478-487.

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2024 г.

Впервые выполнен комплексный мегарегиональный анализ особенностей потенциальной газонасыщенности верхней части разреза в арктических морях Восточной Сибири, Чукотки и Аляски по 2086 объектам, выделенным по временным разрезам сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ) общей протяженностью около 40 тыс. км. Установлено, что газонасыщенность придонных отложений в рассмотренных морях зависит от их тектонической активности на поздних стадиях осадконакопления. Наибольшая плотность распространения потенциально газонасыщенных объектов обнаружена в морях Лаптевых, Чукотском и Беринговом, а в Восточно-Сибирском море она в 5–6 раз меньше. В нем же наблюдается и минимальная доля объектов вблизи дна (до 100 м). По совокупности результатов подтверждена низкая тектоническая активность (дислоцированность) на поздних стадиях осадконакопления на акватории Восточно-Сибирского моря, что согласуется с характером временных разрезов МОГТ. Полученные результаты могут служить важной информацией для повышения эффективности и безопасности геологоразведочных работ на нефть и газ на рассмотренных акваториях.

Ключевые слова: Арктика, сейсморазведка МОГТ, временные разрезы, верхняя часть разреза, залежи газа, мелкозалегающий газ, газовые карманы, газовые гидраты.

Введение

В последние десятилетия в России, как и в других ведущих нефтегазодобывающих странах, уделяется все больше внимания вопросам экологической безопасности нефтегазовой отрасли, особенно при освоении ресурсов углеводородов на акваториях Мирового океана. Среди широкого спектра существующих природных и техногенных угроз особенно выделяются достаточно часто возникающие осложнения в процессе бурения скважин, связанные с газонасыщенностью верхней части разреза (ВЧР — глубины до 500—900 м) [1—11]. За рубежом изучению газонасыщенности ВЧР уделяется большое внимание, при этом залежи газа в ВЧР, экранированные непроницаемыми слоями, чаще всего называют мелкозалегающим газом (shallow gas) и/или газовыми карманами (gas pockets) [9; 11]. Из-за выбросов, самовоспламенений и взрывов газа из ВЧР пострадали и/или полностью разрушены многие сотни буровых установок на суше

и акваториях Мирового океана и нанесен огромный урон нефтегазовым промыслам и экосистеме нефтегазодобывающих стран [1—4; 11]. Статистически около «трети всех выбросов» газа при бурении происходит из ВЧР [11, с. 362].

Особенно остро вопрос безопасности бурения скважин стоит при освоении морских месторождений в арктических и субарктических условиях, характеризующихся коротким рабочим сезоном, затрудняющим ликвидацию последствий возможных аварий. При бурении поисковых скважин неоднократно происходили неконтролируемые выбросы газа, в том числе на месторождении Mikkel в Норвежском море в 1985 г. (буровая установка West Vanguard), при бурении скважины Лунинская-1 в Баренцевом море в 1991 г. («Шельф-8»), при бурении инженерно-геологической скважины в Печорском море в 1995 г. (буровое судно «Бавенит») и др. [1—4; 11].

ВЧР нефтегазоносных бассейнов характеризуется широким разнообразием объектов, связанных с генерацией, накоплением и миграцией газа разного генезиса (преимущественно метана). Непосредственно в ВЧР генерируется микробиальный метан, который может образовывать смеси с метаном и другими газами из нижележащих зон генерации, включая термогенный метан глубоких горизонтов [12]. Газ в ВЧР может находиться в свободном и/или гидратном состоянии [13—17]. Любое состояние газа несет угрозы при проведении буровых работ, однако залежи газа в свободном состоянии с аномально высокими пластовыми давлениями несут наибольшие угрозы в виде мгновенных (импульсных) выбросов — пневматических выхлопов, в наибольшем количестве случаев сопровождающихся самовоспламенениями и взрывами газа [3; 4]. Опасность газонасыщенных отложений ВЧР шельфа и суши Арктики для проведения буровых работ подтверждается обнаружением обширных зон активных выходов/просачиваний/сипов (seeps) газа, формирующих на эхограммах факелы газа (gas flares), а также крупных кратеров/покмарок (rockmarks) из-за импульсной/взрывной дегазации [1—4; 10; 11; 18].

Основным методом выявления и изучения потенциальных газонасыщенных объектов (далее ПГО) в ВЧР является сейсморазведка методом общей глубинной точки (МОГТ), эффективность и разрешающая способность которой возрастает с расширением частотного диапазона регистрируемых колебаний. На шельфе Арктики накоплен огромный объем архивных данных нефтегазопроисковой сейсморазведки МОГТ, позволяющих изучать ВЧР с минимальными затратами, исключая постановку новых дорогостоящих полевых работ. Арктический шельф морей Восточной Сибири и Дальнего Востока России недостаточно изучен с точки зрения геологического строения и нефтегазоносности. В связи с этим целенаправленные исследования газонасыщенности ВЧР могут способствовать получению новых данных о геологическом строении региона, функционировании региональных углеводородных систем и выявлению путей возможной вертикальной миграции газа, что важно для геологоразведочных работ на нефть и газ. Выявление путей вертикальной миграции газа также важно при экологических и климатологических исследованиях. Эмиссия метана в гидросферу и атмосферу из ВЧР нарушает сложившийся баланс газов, что может влиять на глобальные изменения климата на Земле [18—20].

Впервые большие объемы таких исследований (около 49 тыс. км сейсмопрофилей) были выполнены в 2014—2023 гг. авторами данной работы для акваторий Охотского моря [21], шельфа Восточной Сибири, Дальнего Востока (Россия) [22—27] и Аляски (США) [28].

Целью настоящей работы являлся комплексный анализ результатов ряда ранее выполненных исследований авторов, направленных на изучение газонасыщенности ВЧР шельфовых зон арктического ре-

гиона России и США, включая моря Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское, Бофорта и Берингово [22—28], для выявления мегарегиональных закономерностей пространственного и глубинного распространения потенциально газонасыщенных объектов в ВЧР, а также их распределения по горизонтальным размерам.

Материалы и метод исследования

На временных разрезах сейсморазведки МОГТ ПГО определяются по ряду динамических и кинематических признаков, которые приводятся в цифровой индексации, принятой в работах авторов [22—28]:

- 1) резкое локальное повышение амплитуды отражений (bright spot — яркое пятно) над ПГО;
- 2) инверсия фаз отражений (смена полярности);
- 3) прогибание осей синфазности отраженных волн под ПГО (pull-down), обусловленное уменьшением значений скорости распространения упругих волн в газонасыщенных отложениях (кинематические искажения);
- 4) снижение частот регистрируемых колебаний за счет аномального поглощения высокочастотных составляющих;
- 5) наличие «зоны акустической тени» — ухудшение прослеживания сейсмических горизонтов под ПГО (пониженные амплитуды отражений);
- 6) наличие плоских осей синфазности (flat spot — плоское пятно), соответствующих отраженным волнам от возможного газоводяного контакта.

На временных разрезах МОГТ также выделяются зоны миграции газа (gas chimney — газовая труба) в виде субвертикальных нарушений прослеживаемости осей синфазности отраженных волн, обычно приуроченных к разрывным нарушениям.

Признаком присутствия залежей газогидратов (ГГ) на временных разрезах является псевдодонный отражающий горизонт (BSR — bottom simulating reflector), указывающий на подошву зоны стабильности ГГ, под которой газ находится в свободном состоянии [1; 11; 13—17]. Горизонт BSR определяется по следующим признакам: субпараллельность поверхности морского дна, сечение слоистости вмещающих пород (хорошо выделяется на континентальном склоне), обратная полярность отраженных волн.

Результаты исследований и их обсуждение

Для выявления ПГО на акваториях морей Лаптевых и Восточно-Сибирского выполнялся анализ архивных временных разрезов МОГТ АО «МАГЭ» 2005—2016 гг. в объеме 17,68 тыс. км (табл. 1), положение которых показано на рис. 1 [15; 22; 25—27]. Изучение ПГО в морях Чукотском, Бофорта и Беринговом проводилось по временным разрезам МОГТ Геологической службы США (USGS) в объеме 23,84 тыс. км (см. табл. 1, рис. 1), находящимся в открытом доступе (<https://walrus.wr.usgs.gov/namss/>) [23; 24; 28].

На рис. 2 для пяти рассматриваемых акваторий приведены фрагменты временных разрезов МОГТ

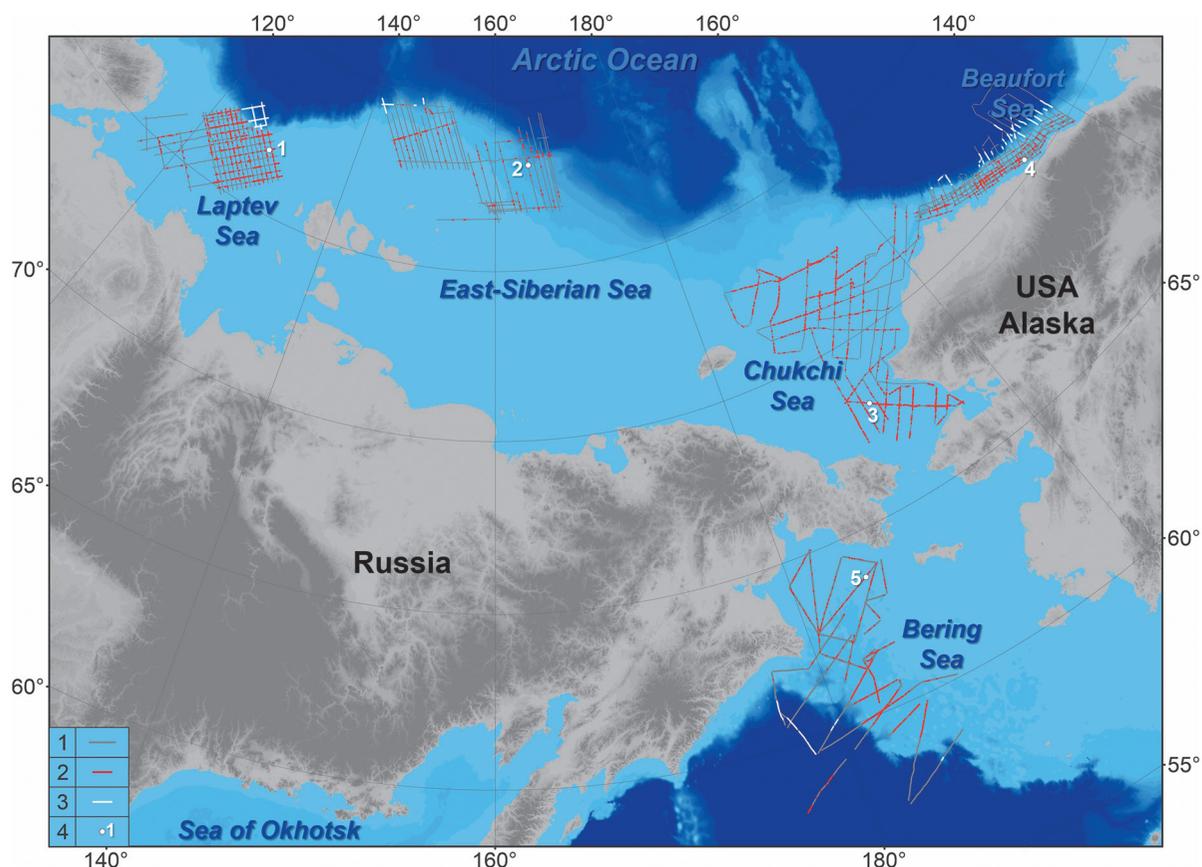


Рис. 1. Картографическая схема расположения сейсмопрофилей (1) с выделенными потенциально газонасыщенными объектами (ПГО) (2), газовыми гидратами (3) и положением фрагментов ПГО (4), приведенных на рис. 2.
 Fig. 1. Location map of seismic lines (1) with marked potentially gas-saturated objects (PGSOs) (2), gas hydrates (3) and positions of the PGSO fragments (4) shown in Fig. 2.

Таблица 1. Объемы проанализированных сейсмопрофилей и характеристики потенциально газонасыщенных объектов (ПГО)

Table 1. Volumes of analyzed seismic lines and characteristics of potentially gas-saturated objects

Море	Общая длина профилей, км	Количество выделенных ПГО	Средний интервал между ПГО, км	Доля ПГО до глубин 100 м, %	Наиболее протяженные ПГО, км
Лаптевых	7810	550	14,2	66,5	Более 7
Восточно-Сибирское	8200	129	63,6	31,8	Более 7
Чукотское	9500	782	12,1	57,5	Более 7
Бофорта	8440	184	22,0	66,8	4—4,5
Берингово	5900	441	13,4	49,0	5—5,5
Итого	39 850	2086	19,1	57,3	Более 7

с ярко выделяющимися аномальными объектами (неоднородностями) в ВЧР, указывающими на наличие ПГО. Единой особенностью для всех пяти ПГО является их многопластовый характер, что встречается на абсолютном большинстве ПГО. Все пять ПГО однозначно выделяются по пяти перечисленным выше признакам (1—5). Шестой признак (плоские пятна) однозначно не просматривается, что связано с недостаточно высокими частотами регистрации колебаний, небольшими горизонтальными размерами ПГО (1—2,5 км) и их амплитудой/высотой. На всех сейсмических отражающих горизонтах ниже

ПГО отчетливо наблюдаются прогибы из-за снижения скоростей распространения сейсмических волн (признак 3), которые могут внести сильные искажения в структурные построения целевых горизонтов на больших глубинах (если не будет детального анализа и учета скоростей в районе ПГО).

Отметим некоторые особенности пяти ПГО, приведенных на рис. 2. Наименьшее количество ПГО (2—3) наблюдается на примере для Восточно-Сибирского моря (рис. 2.2), при этом верхняя часть ПГО находится на максимальной (свыше 200 м) глубине от дна по сравнению с другими примерами

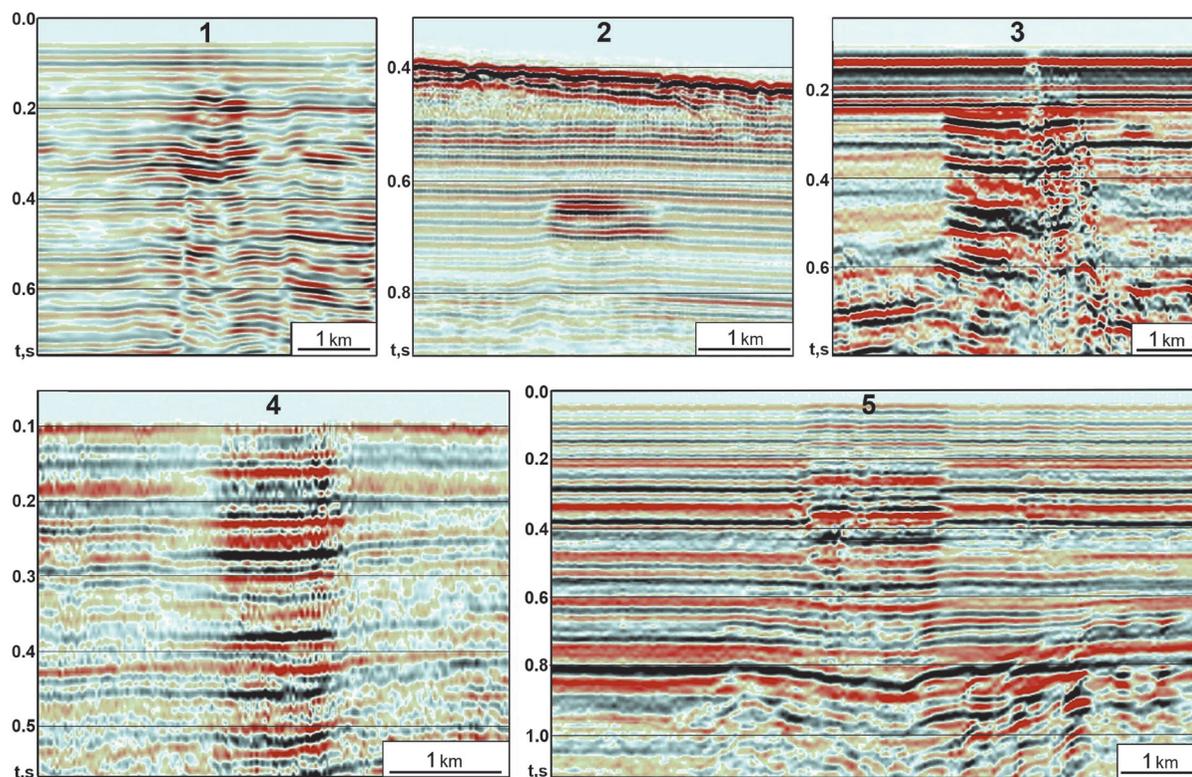


Рис. 2. Фрагменты временных разрезов с потенциально газонасыщенными объектами (ПГО) в морях Лаптевых (1), Восточно-Сибирском (2), Чукотском (3), Бофорта (4) и Беринговом (5) (положение ПГО на карте показано на рис. 1)
 Fig. 2. Fragments of seismic sections with potentially gas-saturated objects (PGSOs) in the Laptev (1), East Siberian (2), Chukchi (3), Beaufort (4) and Bering (5) seas (location of PGSOs on the map is shown in Fig. 1)

ми. В придонных отложениях разреза в Чукотском море (рис. 2.3) наблюдается канал дегазации с возможной покмаркой (кратером) в рельефе дна, при этом из-за признака 3 происходит полное разрушение осей синфазности глубоких горизонтов (свыше 0,7 с). В Беринговом море наиболее ярко выраженные ПГО (наибольшее газонасыщение) длиной около 2 км наблюдаются на глубинах около 200—450 м (0,2—0,45 с), при этом вблизи дна (до 100 м) также имеются ПГО, а в рельефе дна виден бугор пучения.

Море Лаптевых

По морю Лаптевых были проанализированы разрезы АО «МАГЭ» по каркасной сети сейсмопрофилей 2005—2009 гг., охватывающих центральную и юго-западную части акватории общей протяженностью около 7810 км (см. рис. 1) [22]. Всего в ходе анализа выявлено 550 ПГО (табл. 1, рис. 3), в результате анализа особенностей которых установлено, что их большинство имеет размеры до 2,5 км (86,5%), при этом менее 0,5 км — 33,9%. При среднем интервале между ПГО 14,2 км наибольшая их плотность выявлена в Центрально-Лаптевском районе (11,4 км). Большая часть объектов (82,6%) имеет верхнюю границу газонасыщения на глубинах до 200 м, а максимальное количество (66,5%) находится вблизи дна (до 100 м). Полученная модель глубинного распространения газонасыщенных объектов предположительно связана с большим коли-

чеством разрывных нарушений — потенциальных каналов миграции газа в осадочном чехле, большинство которых доходит до морского дна и отображается в его рельефе в виде ступеней [29; 30].

Разломы в море Лаптевых сформировались в позднем мелу-палеоцене в условиях растяжения земной коры и активизировались в позднем миоцене-плейстоцене [31]. Напряжения растяжения передаются на Лаптевоморский шельф от соседнего хребта Гаккеля — активной зоны спрединга, акватория моря Лаптевых и в настоящее время характеризуется высокой сейсмичностью [1; 32]. Обстановка растяжения является благоприятным фактором для интенсивной вертикальной миграции газа, а мощный осадочный чехол (до 12—16 км) указывает на возможность генерации больших объемов термогенных углеводородов. Также полученное распределение свидетельствует о наличии в ряде мест в самых верхних (придонных) отложениях ВЧР (глубины до 100 м) в разной степени герметичных покрышек, не нарушенных разломами. В Центрально-Лаптевском районе авторы провели сопоставление выявленных ПГО в ВЧР с ранее обнаруженными сипами газа [18; 30] и глубинными разломами, выделенными на временных разрезах МОГТ «МАГЭ» [22]. В результате была установлена однозначная приуроченность сипов к глубинным разломам, являющимся каналами дегазации Земли.

На временных разрезах шести сейсмопрофилей, пересекающих континентальный склон моря Лап-

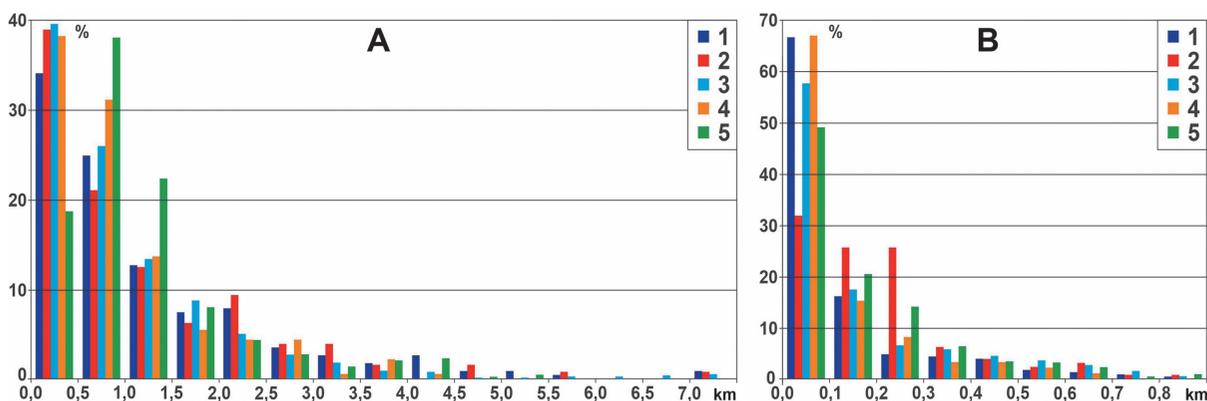


Рис. 3. Долевое распределение между потенциально газонасыщенными объектами в ВЧР по горизонтальным размерам (А) и по глубинам верхних границ газонасыщения (В) в морях Лаптевых (1), Восточно-Сибирском (2), Чукотском (3), Бофорта (4) и Беринговом (5)
 Fig. 3. Shared distribution of potentially gas-saturated objects in the section upper part by horizontal dimensions (A) and by depths of the gas saturation upper boundaries (B) in the Laptev (1), East Siberian (2), Chukchi (3), Beaufort (4), Bering (5) seas

тевых, впервые выделен отражающий горизонт BSR, указывающий на возможное наличие ГГ (см. рис. 1) [27].

Восточно-Сибирское море

По Восточно-Сибирскому морю использованы временные разрезы МОГТ «МАГЭ», построенные по профилям, отрабатанным в северо-западной части акватории в 2011—2012 и 2016 гг., общей длиной около 8200 км. Всего в результате анализа выявлено 129 ПГО [25; 26] (см. рис. 1). В результате анализа распределения выделенных аномальных объектов установлено, что большинство ПГО (83,0%) имеет верхние границы газонасыщения на глубинах до 300 м от морского дна, однако на глубинах менее 100 м расположено всего 31,8% (см. рис. 3 и табл. 1). Большинство ПГО имеет размеры до 2,5 км (87,6%), причем 38,8% ПГО — менее 500 м. При анализе временных разрезов по Восточно-Сибирскому морю было отмечено относительно малое количество разломов, достигающих до морского дна. В Восточно-Сибирском море с позднего миоцена не происходило интенсивных тектонических движений [31], что обуславливает меньшую дислоцированность ВЧР и меньшую интенсивность вертикальной миграции газа к приповерхностным отложениям.

На трех сейсмопрофилях в ВЧР континентального склона выделен горизонт BSR (см. рис. 1), приуроченный к потенциальным залежкам ГГ [25; 26].

Чукотское море

Исходные данные по Чукотскому морю включали временные разрезы МОГТ USGS, отрабатанные в 1978—1980 гг. как в российском, так и в американском секторах акватории, общей длиной около 9500 км. Всего в результате анализа выявлено 782 ПГО [24] (см. рис. 1). Установлено, что большинство объектов имеет верхнюю границу газонасыщения на глубинах до 200 м от дна (74,9%), причем непосредственно у поверхности морского дна

(до 100 м) эта граница расположена у 57,5% всех объектов (см. рис. 3 и табл. 1). Большая часть объектов имеет протяженность вдоль профилей до 2 км (87,2%), а протяженностью до 500 м обладают 39,4% объектов. Высокая газонасыщенность приповерхностной части шельфа Чукотского моря может объясняться наличием множества разрывных нарушений, основных путей вертикальной миграции газа, часть которых подходит близко к поверхности осадочного чехла. Рифтогенез происходил в юре, предположительно, произошла активизация разрывных нарушений в кайнозой. Имеются данные о разломообразовании в четвертичное время [33]. Высокий потенциал нефтегазоносности наиболее погруженной области шельфа — Северо-Чукотского прогиба — прогнозируется по аналогии с соседним бассейном Северного склона Аляски, где открыты месторождения как на суше, так и на акватории [34].

Море Бофорта

Данные по морю Бофорта включали отрабатанные в 1977 и 1982 гг. в американском секторе акватории разрезы USGS общей длиной 8440 м. Всего выявлено 184 ПГО [28] (рис. 2). В результате анализа распределения выделенных ПГО установлено, что большая их часть в море Бофорта (82,6%) характеризуется протяженностью вдоль профилей до 1,5 км. Максимальное количество ПГО сосредоточено в интервале минимальных размеров до 500 м — 38%. По глубине расположения верхних границ ПГО в основном характеризуются отметками до 200 м (82,1%), причем максимальное количество сосредоточено в интервале 0—100 м (66,8%). Приуроченность наибольшего количества ПГО к приповерхностным отложениям может объясняться наличием разрывных нарушений, достигающих до четвертичных отложений. Шельф моря Бофорта относится к бассейну Северного склона Аляски, где различным нефтегазоносным потенциалом обладают отложения в широком стратиграфическом интервале от

карбона до кайнозоя [34]. Нефтегазоносность Северного склона Аляски подтверждается открытыми месторождениями, включая крупные Prudhoe Bay, Kuparuk River на северном побережье Аляски, а также Endicott и другие на шельфе.

На 22 временных разрезах, пересекающих континентальный склон моря Бофорта, выделен отражающий горизонт BSR, указывающий на возможные ГГ (см. рис. 1). Полученные результаты согласуются с данными предшествующих исследований [35; 36]. При этом по морю Бофорта имеются прямые доказательства существования ГГ по данным бурения [37].

Берингово море

По Берингову морю использованы разрезы USGS, отработанные в 1977, 1980 и 1982 гг. в северо-западной части акватории как в российском, так и в американском секторах, общей длиной около 5900 км. Всего выявлен 441 ПГО, в основном в мелководной (до 100 м) зоне [23] (рис. 2). В результате анализа распределения выделенных ПГО установлено, что 86,2% их относятся к глубинам верхних границ газонасыщения до 300 м, а максимальное количество доходит до глубин менее 100 м (50,6%). 87,3% ПГО имеют размеры менее 2 км, максимальное количество характеризуется размерами 500—1000 м (38,2%). Причиной высокой концентрации ПГО в приповерхностных отложениях, как и в рассмотренных выше морях, может являться распространение в ВЧР разломов — каналов миграции газа из глубоких отложений. В Анадырском бассейне активные тектонические движения имели место в кайнозое, что обуславливает дислоцированность отложений ВЧР и активную миграцию углеводородов по разломам [38]. На шельфе нет открытых месторождений, однако на суше имеется ряд открытых, подтверждающих углеводородный потенциал региона.

В Алеутской котловине выделено 14 ПГО на больших глубинах 500—700 м, что может объясняться экранированием свободного газа залежами ГГ, присутствующими при высоких давлениях водной толщи. Также на четырех разрезах, пересекающих континентальный склон Берингова моря и Алеутскую котловину, выделен отражающий горизонт BSR, указывающий на потенциальное наличие ГГ. Отметим, что в данном регионе ГГ прогнозировались ранее [39; 40].

Обобщающее обсуждение результатов по всем акваториям

Наиболее часто ПГО расположены в Беринговом, Чукотском морях и в центральной части моря Лаптевых (в среднем через 11,4—14,2 км, см. табл. 1), а наименее плотно (63,6 км) — в Восточно-Сибирском. Различия полученной плотности распространения ПГО по рассмотренным морям могут быть обусловлены литологическими неоднородностями отложений ВЧР соответствующих регионов, влияющими на распространение резервуаров и флюидо-

упоров. Изученный район Восточно-Сибирского моря (севернее поднятия Де-Лонга) характеризуется меньшими мощностью осадочного чехла и количеством разломов, доходящих до придонных отложений, и соответственно менее интенсивной вертикальной миграцией.

Общая закономерность распределения ПГО по горизонтальным размерам может указывать на преимущественно небольшие размеры природных резервуаров в ВЧР изученных морей: от 55% до 70% ПГО имеют горизонтальные размеры до 1 км (рис. 3а), хотя размеры отдельных залежей в морях Восточной Сибири и Чукотки превышают 7 км, что может представлять интерес для поисков и разведки (рис. 3А).

Общая закономерность глубинного распределения ПГО для морей Лаптевых, Чукотского и Бофорта — превалирование (57,5—66,5%) объектов с верхней границей газонасыщения на глубинах до 100 м от морского дна (рис. 3В) — может быть связана с интенсивными тектоническими движениями в соответствующих регионах на стадии накопления отложений ВЧР, в результате которых образовались или активизировались разломы — проводники газа к придонным отложениям. В Беринговом море до глубины 100 м доходит около половины ПГО (49,0%). В Восточно-Сибирском море более спокойный режим осадконакопления, начавшийся с позднего миоцена, что обуславливает меньшее количество разломов, доходящих до придонных отложений, и соответственно меньшую концентрацию в них ПГО, сформированных мигрирующим по разломам газом (всего 31,8%). Тем не менее субвертикальная миграция газа по разломам наряду с генерацией биогаза *in situ* также представляется ключевым фактором распространения ПГО в Восточно-Сибирском море, что выражается концентрацией их большей части на глубине от дна 100—300 м (51,2%).

Положение участков временных разрезов с выделенными горизонтами BSR во всех рассмотренных акваториях согласуется с зоной, благоприятной для образования и существования ГГ, определенной для Северного Ледовитого океана и прилегающих акваторий в публикации [16] на основе анализа обширной базы данных по придонным температурам воды NOAA World Ocean Database 13 (WOD13) [41].

Заключение

В ходе мегарегиональных исследований изучена потенциальная газонасыщенность ВЧР акваторий северных морей Восточной Сибири и Дальнего Востока России, а также моря Бофорта на шельфе Аляски (США). В результате интерпретации временных разрезов МОГТ общей протяженностью около 40 тыс. км по морям Лаптевых, Восточно-Сибирскому, Чукотскому, Бофорта и Берингову суммарно выявлено 2086 аномалий сейсмической записи, указывающих на наличие ПГО в ВЧР.

Построенные модели распространения ПГО в ВЧР показали, что выделенные объекты преимуще-

ственно имеют верхнюю границу предполагаемого газонасыщения на глубинах до 300 м от морского дна (81,5—90,2%) и характеризуются линейными размерами до 2—2,5 км (86,5—92,4%). Преимущественное распространение ПГО в приповерхностных отложениях ВЧР объясняется как генерацией микробного газа *in situ*, так и субвертикальной миграцией газа по разломам из отложений, расположенных ниже по разрезу. Связь распределения газонасыщенных объектов в ВЧР с миграцией по разломам свидетельствует о высоковероятном наличии углеводородов в осадочном комплексе отложений, которые в настоящее время на основе накопленной геолого-геофизической информации прогнозируются как высоко нефтегазоперспективные [1; 31; 34; 42; 43]. Установлено, что газонасыщенность придонных отложений в рассмотренных регионах зависит от их тектонической активности на поздних стадиях осадконакопления.

Полученные результаты могут служить важной информацией для повышения эффективности и безопасности бурения глубоких нефтегазопроисловых скважин на рассмотренных акваториях. Изучение и картирование распространения газонасыщенных объектов в ВЧР необходимы для выбора оптимальных точек бурения в целях предотвращения газовых выбросов, способных приводить к серьезным аварийным и даже катастрофическим ситуациям. Возможно, в будущем некоторые из выделенных ПГО будут представлять самостоятельный интерес для обеспечения потребностей в энергетических ресурсах близлежащих населенных пунктов и промышленных объектов на побережье, как это уже происходит на шельфе Мексиканского залива США и Северного моря (Нидерланды) [44].

На континентальном склоне акваторий морей Лаптевых, Восточно-Сибирского, Бофорта, Берингова по временным разрезам МОГТ выявлен отражающий горизонт BSR, указывающий на вероятное наличие ГГ. Область распространения горизонта BSR согласуется с зоной благоприятных термобарических условий для стабильного существования гидратов метана, определенной в [16].

Финансирование

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

Благодарность

Авторы благодарны АО «МАГЭ» в лице генеральных директоров, докторов наук Г. С. Казанина и А. Г. Казанина за многолетнее плодотворное сотрудничество. Авторы признательны Геологической службе США (USGS) за предоставленную возможность использования материалов сейсморазведки МОГТ 2D по акваториям морей Бофорта, Чукотского и Берингова.

Литература/References

1. Богоявленский В. И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов // Тр. Вольного экон. о-ва. — 2014. — Т. 182, № 3. — С. 12—175.
2. Богоявленский В. И. Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // Бурение и нефть. — 2015. — № 6. — С. 4—9.
3. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Гор. пром-сть. — 2020. — № 1. — С. 97—118.
4. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Кишанков А. В. Геофизические методы обеспечения технологического суверенитета и национальной безопасности России в Арктике // Вестн. РАН. — 2024. — Т. 94, № 10. — С. 896—914.
5. Дзюбло А. Д., Ермолаев А. И., Гереш Г. М., Перекрестов В. Е. Влияние мелкозалегающего газа на проектные решения по освоению морских газоконденсатных месторождений на шельфе арктических и субарктических морей // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 2. — С. 192—204.
6. Миронюк С. Г., Семёнова А. А. Региональные особенности распространения геологических опасностей на шельфе Баренцева моря // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения. — М., 2017. — С. 152—160.
7. Рокос С. И. Инженерно-геологические особенности приповерхностных зон аномально высокого пластового давления на шельфе Печорско-

- го и южной части Карского морей // Инженер. геология. — 2008. — № 4. — С. 22—28.
- Rokos S. I. Engineering geological features of near-surface zones of abnormally high formation pressure on the shelf of the Pechora Sea and the southern part of the Kara Sea. *Engineering geology*, 2008, no. 4, pp. 22—28. (In Russian).
8. Соколов С. Ю., Мороз Е. А., Зарайская Ю. А. и др. Картирование опасных геологических объектов и процессов северной и центральной частей шельфа Баренцева моря по данным гидроакустического комплекса НИС «Академик Николай Страхов» // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 2. — С. 164—179.
- Sokolov S. Yu., Moroz E. A., Zarayskaya Yu. A. et al. Mapping of dangerous geological objects and processes at the Northern and Central parts of the Barents Sea shelf according to the hydroacoustic data from RV "Akademik Nikolai Strakhov". *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 164—179. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-164-179. (In Russian).
9. Andreassen K., Nilssen E. G., Ødegaard C. M. Analysis of shallow gas and fluid migration within the Plio-Pleistocene sedimentary succession of the SW Barents Sea continental margin using 3D seismic data. *Geo-Marine Letters*, 2007, vol. 27, no. 2-4, pp. 155—171.
10. Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M. et al. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. *Science*, 2017, vol. 356, pp. 948—953.
11. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. New York, USA, Cambridge Univ. Press, 2007, 475 p.
12. Вассоевич Н. Б. Принципиальная схема вертикальной зональности в генерации углеводородных газов и нефти // Изв. АН СССР. Сер. геол. — 1974. — № 5. — С. 17—29.
- Vassoevich N. B. Principal scheme of vertical zoning of generation of hydrocarbon gases and oil. *Izvestiya Akad. Nauk SSSR*, 1974, no. 5, pp. 17—29. (In Russian).
13. Гинсбург Г. Д., Соловьев В. А. Субмаринные газовые гидраты. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 1994. — 199 с.
- Ginsburg G. D., Soloviev V. A. Submarine gas hydrates. Saint Petersburg, VNIIOkeangeologia, 1994, 199 p. (In Russian)
14. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИГАЗ, 2009. — 192 с.
- Yakushev V. S. Natural gas and gas hydrates in cryolithozone. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (In Russian).
15. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A. Evidence of large-scale absence of frozen ground and gas hydrates in the northern part of the East Siberian Arctic shelf (Laptev and East Siberian seas). *Marine and Petroleum Geology*, 2023, vol. 148, p. 106050.
16. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlensky I. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas. *Geosciences*, 2018, vol. 8, no. 12, 453, pp. 1—17.
17. Andreassen K., Hart P. E., Grantz A. Seismic studies of a bottom simulating reflection related to gas hydrate beneath the continental margin of the Beaufort Sea. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, vol. 100, no. B7, pp. 12659—12673.
18. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. 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, vol. 373, no. 2052, p. 20140451.
19. Анисимов О. А., Борзенкова И. И., Лавров С. А., Стрельченко Ю. Г. Современная динамика подводной мерзлоты и эмиссия метана на шельфе морей Восточной Арктики // Лед и Снег. — 2012. — № 2. — С. 97—105.
- Anisimov O. A., Borzenkova I. I., Lavrov S. A., Strelchenko Yu. G. Current Dynamics of subsea permafrost and methane emission on the shelf of the Eastern Arctic seas. *Ice and Snow*, 2012, no. 2, pp. 97—105. (In Russian).
20. Sayedi S. S., Abbott B. W., Thornton B. F. et al. Subsea permafrost carbon stocks and climate change sensitivity estimated by expert assessment. *Environmental Research Letters*, 2020, vol. 15, no. 12, p. 124075. DOI: 10.1088/1748-9326/abcc29.
21. Богоявленский В. И., Керимов В. Ю., Ольховская О. О. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Охотское море // Нефтяное хоз-во. — 2016. — № 6. — С. 43—47.
- Bogoyavlensky V. I., Kerimov V. Yu., Olkhovskaya O. O. Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Sea of Okhotsk. *Neftyanoe khozyaistvo*, 2016, no. 6, pp. 43—47. (In Russian).
22. Богоявленский В. И., Казанин Г. С., Кишанков А. В. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: море Лаптевых // Бурение и нефть. — 2018. — № 5. — С. 20—29.
- Bogoyavlensky V. I., Kazanin G. S., Kishankov A. V. Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Laptev Sea. *Drilling and oil*, 2018, no. 5, pp. 20—28. (In Russian).
23. Богоявленский В. И., Кишанков А. В. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Берингово море // Бурение и нефть. — 2018. — № 9. — С. 4—12.
- Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V. Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Bering Sea. *Drilling and oil*, 2018, no. 9, pp. 4—12. (In Russian).
24. Богоявленский В. И., Кишанков А. В. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Чукотское море (Россия и США) // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 2 (38). — С. 45—58.
- Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V. Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Chukchi Sea (Russia and the USA). *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 2 (38), pp. 45—58. (In Russian).
25. 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.
- Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G., Kazanin G. A. Dangerous gas-saturated objects in the

- World Ocean: the East Siberian Sea. Arctic: Ecology and Economy, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 158—171. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-158-171. (In Russian).
26. Богоявленский В. И., Кишанков А. В., Казанин А. Г. Неоднородности верхней части разреза осадочной толщи Восточно-Сибирского моря: залежи газа и следы ледовой экзарации // Докл. Акад. наук. Наука о Земле. — 2022. — Т. 505, № 1. — С. 5—10. — DOI: 10.31857/S2686739722070040.
- Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G.* Heterogeneities in the Upper Part of the Section of the Sedimentary Cover of the East Siberian Sea: Gas Accumulations and Signs of Ice Gouging. *Doklady Earth Sciences*, 2022, vol. 505, no. 1, pp. 411—415. DOI: 10.1134/S1028334X22070042.
27. *Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A., Kazanin G.* Distribution of permafrost and gas hydrates in relation to intensive gas emission in the central part of the Laptev Sea (Russian Arctic). *Marine and Petroleum Geology*, 2022, vol. 138, p. 105527. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105527>.
28. Богоявленский В. И., Кишанков А. В. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: море Бофорта, шельф Северного склона Аляски // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 2. — С. 201—210.
- Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V.* Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Beaufort Sea, Alaska North Slope shelf. *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 201—210. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-201-210. (In Russian).
29. *Baranov B. V., Lobkovsky L. I., Dozorova K. A., Tsukanov N. V.* The Fault System Controlling Methane Seeps on the Shelf of the Laptev Sea. *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 486, pp. 571—574. DOI: 10.1134/S1028334X19050209.
30. *Baranov B., Galkin S., Vedenin A., Dozorova K., Gebbruk A., Flint M.* Methane seeps on the outer shelf of the Laptev Sea: characteristic features, structural control, and benthic fauna. *Geo Mar. Lett.*, 2020, vol. 40 (4), pp. 541—557. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00367-020-00655-7>.
31. *Drachev S. S., Malyshev N. A., Nikishin A. M.* Tectonic history and petroleum geology of the Russian Arctic Shelves: an overview. Geological society, London, Petroleum geology conference series. London, the Geological Society of London, 2010, vol. 7, no. 1, pp. 591—619.
32. Аветисов Г. П. Еще раз о землетрясениях моря Лаптевых // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. — Вып. 3. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2000. — С. 104—114.
- Avetisov G. P.* Once again on the earthquakes in the Laptev Sea. Geological-geophysical features of the lithosphere of the Arctic Region. Iss. 3. St. Petersburg, VNIIOkeanгеология, 2000, pp. 104—114. (In Russian).
33. *Grantz A., Dinter D. A., Hill E. R. et al.* Geologic framework, hydrocarbon potential, and environmental conditions for exploration and development of proposed oil and gas lease Sale 85 in the central and northern Chukchi Sea. U.S. Geological Survey Open-File Report 82-1053, 1982, 84 p.
34. Богоявленский В. И., Полякова И. Д., Будагова Т. А. и др. Геолого-геофизическая изученность и нефтегазоносность акваторий циркумарктического сегмента Земли // Геология нефти и газа. — 2011. — № 6. — С. 45—58.
- Bogoyavlensky V. I., Polyakova I. D., Budagova T. A., Bogoyavlensky I. V., Danilina A. N.* Geological and geophysical studies of oil and gas potential of offshore areas of Circumarctic segment of the Earth. *Oil and Gas Geology*, 2011, no. 6, pp. 45—58. (In Russian).
35. *Andreassen K., Hart P. E., Grantz A.* Seismic studies of a bottom simulating reflection related to gas hydrate beneath the continental margin of the Beaufort Sea. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, vol. 100, no. B7, pp. 12659—12673.
36. *Kvenvolden K. A., Grantz A.* Gas hydrates of the Arctic Ocean region. Grantz et al. (Eds). *The Arctic Ocean Region (Geol. North Am., L). Colo. Geol. Soc. Am.*, 1990, pp. 539—549.
37. *Paull C. K., Dallimore S. R., Caress D. W. et al.* Active mud volcanoes on the continental slope of the Canadian Beaufort Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 3160—3181.
38. Антипов М. П., Бондаренко Г. Е., Бордовская Т. О., Шипилов Э. В. Тектоническая эволюция Анадырской впадины в связи с перспективами ее нефтегазоносности (Северо-Восток Евразии) // Геотектоника. — 2009. — № 5. — С. 74—96.
- Antipov M. P., Bondarenko G. E., Bordovskaya T. O., Shipilov E. V.* Tectonic evolution of the Anadyr Basin, northeastern Eurasia, and its petroleum resource potential. *Geotectonics*, 2009, vol. 43, pp. 399—419. (In Russian).
39. *Sakamoto T., Takahashi K., Iijima K. et al.* Data report: site surveys in the Bering Sea for Integrated Ocean Drilling Program Expedition 323 (as part of IODP Proposal 477). *Proc. IODP*, 2011, vol. 323, p. 2.
40. *Scholl D. W., Hart P. E.* Velocity and amplitude structures on seismic reflection profiles-possible massive gas-hydrate deposits and underlying gas accumulations in the Bering Sea Basin. *The future of energy gases*, 1993, pp. 331—351.
41. *Boyer T. P., Baranova O. K., Coleman C. et al.* NOAA Atlas NESDIS 87. World Ocean Database, 2018.
42. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Богоявленская О. В., Никонов Р. А. Перспективы нефтегазоносности седиментационных бассейнов и фундамента Циркумарктического региона // Геология нефти и газа. — 2017. — № 5. — С. 5—20.
- Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Bogoyavlenskaya O. V., Nikonov R. A.* Prospects for oil and gas content of sedimentary basins and the basement of the Circum-Arctic region. *Geology of Oil and Gas*, 2017, no. 5, pp. 5—20.
43. Ступакова А. В., Бордунов С. И., Сауткин Р. С. и др. Нефтегазоносные бассейны российской Арктики // Геология нефти и газа. — 2013. — № 3. — С. 30—47.

Stupakova A. V., Bordunov S. I., Sautkin R. S. et al. Oil and gas bearing basins of the Russian Arctic. Oil and gas geology, 2013, no. 3, pp. 30—47. (In Russian).

44. Boogaard M., Hoetz G. Seismic characterisation of shallow gas in the Netherlands. Abstract FORCE Seminar Stavanger 8—9 April 2015. [S. I.], 2015.

Информация об авторах

Богоявленский Василий Игоревич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией «Шельф», главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: geo.ecology17@gmail.com.

Кишанков Алексей Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

DANGEROUS GAS-SATURATED OBJECTS ON THE ARCTIC SHELF OF EASTERN SIBERIA, THE FAR EAST (RUSSIA) AND ALASKA (USA)

Bogoyavlensky, V. I., Kishankov, A. V.

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

For citing

Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V. Dangerous gas-saturated objects on the Arctic shelf of Eastern Siberia, the Far East (Russia) and Alaska (USA). Arctic: Ecology and Economy, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 478—487. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-478-487. (In Russian).

The article was received on September 10, 2024

Abstract

For the first time, a comprehensive megaregional analysis of features of potential gas saturation of shallow deposits of the Arctic seas of Eastern Siberia, Chukotka and Alaska was carried out for 2086 objects revealed in CDP seismic sections with a total length of 40 thousand km. It was established that the gas saturation of shallow deposits in the studied areas depended on their tectonic activity on late stages of sedimentation. The highest density of distribution of potentially gas-saturated objects was revealed in the Laptev, Chukchi and Bering seas; in the East Siberian Sea it was 5-6 times lower. Also, in this sea, a minimal share of objects near the bottom (up to 100 m) was observed. The results as a whole confirm low tectonic activity (dislocation) at the late stages of sedimentation in the East Siberian Sea, which concurs with the pattern of the CDP seismic sections. The results can serve as important information for increasing the efficiency and safety of oil and gas exploration in the studied offshore areas.

Keywords: Arctic, CDP (common depth point) seismic survey, seismic sections, upper part of the section, gas deposits, shallow gas, gas pockets, gas hydrates.

Funding

The research was carried out according to the state assignment of the Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences on the topic “Improving the efficiency and environmental safety of the oil and gas resources development in the Arctic and Subarctic zones of the Earth in a changing climate” (no. 122022800264-9).

Acknowledgements

The authors are grateful to JSC MAGE, represented by general directors, doctors of sciences G. S. Kazanin and A. G. Kazanin, for many years of fruitful cooperation. The authors are grateful to the United States Geological Survey (USGS) for the provided opportunity to use 2D CDP seismic survey materials for the areas of the Beaufort, Chukchi and Bering seas.

Information about the authors

Bogoyavlensky, Vasily Igorevich, Doctor of Engineering Science, Corresponding member of RAS, Deputy Director for Science, Head of “Shelf” Laboratory, Chief Researcher, Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: geo.ecology17@gmail.com.

Kishankov, Aleksei Vladimirovich, PhD of Geological and Mineralogical Science, Senior Researcher, Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: alexey137k@yandex.ru.