

ОПАСНЫЕ ГАЗОНАСЫЩЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ НА АКВАТОРИЯХ МИРОВОГО ОКЕАНА: МОРЕ БОФОРТА, ШЕЛЬФ СЕВЕРНОГО СКЛОНА АЛЯСКИ

В. И. Богоявленский, А. В. Кишанков

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

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2023 г.

Статья посвящена изучению газоносности верхней части осадочной толщи в западном секторе моря Бофорта, прилегающем к Аляске. Впервые выполнена интерпретация верхней части временных разрезов сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ) по 52 сейсмопрофилям Геологической службы США (USGS) в объеме 4050 км. Обнаружено 184 аномальных объекта в придонных отложениях, потенциально связанных с залежами газа (газовыми карманами). Среднее расстояние между этими объектами вдоль профилей составило 22 км, что на 80% больше, чем в Чукотском море. Это, видимо, связано с меньшей тектонической активностью в море Бофорта. Статистически установленное подобие аномальных объектов в этих морях по глубинам и горизонтальным размерам обусловлено схожими геологическими условиями формирования осадочных отложений. Кроме того, по 60 сейсмопрофилям общей протяженностью 4390 км показано широкое распространение потенциальных залежей газогидратов на континентальном склоне моря Бофорта, что согласуется с ранее сделанными выводами ученых США и Норвегии.

Ключевые слова: Мировой океан, море Бофорта, Чукотское море, Северный склон Аляски, сейсморазведка МОГТ, верхняя часть разреза, залежи газа, газовые карманы, кратеры выброса газа, грязевые вулканы, газовые гидраты.

Введение

В последнее десятилетие мировое научное сообщество уделяет большое внимание возрастающей концентрации в атмосфере парниковых газов, влияющих на глобальное потепление климата [1—6]. При этом больше всего неоднозначностей в оценке объемов природной и антропогенной эмиссии парниковых газов, особенно метана, относится к суше и акваториям Арктики [3; 4]. Изучение газоносности верхней части разреза (ВЧР — глубины до 500—900 м) и процессов природной и техногенной дегазации Земли в Арктике, нередко имеющих опасную взрывную форму, давно входит в сферу интересов многих отечественных и зарубежных ученых [1; 2; 6—13], включая авторов [14—23].

Ярким примером дегазации недр, представляющей угрозу для жизнедеятельности человека, являются мощные выбросы и взрывы газа на севере Западной Сибири, особенно на полуострове Ямал, где ведется активная разработка месторождений углеводородов (УВ) [14—16]. Газонасыщенность ВЧР — осложняющий фактор при бурении скважин на суше и акваториях, так как вскрытие приповерхностных газовых залежей нередко приводит к неконтроли-

руемым выбросам газа и/или смеси УВ, создающим серьезные аварийные и даже катастрофические ситуации [14—16]. Изучение газоносности ВЧР важно как для повышения безопасности и эффективности геологоразведочных работ на нефть и газ, так и для понимания развития углеводородных систем изучаемого региона.

При изучении ВЧР особое место занимает вопрос распространения газовых гидратов (ГГ) — кристаллических соединений газа и воды, стабильных при высоких давлениях и низких температурах [10—12]. При этом потенциальные залежи ГГ рассматриваются как опасный объект при бурении и альтернативный источник энергии будущего. Важность изучения ГГ также связана с предполагаемой угрозой возможной интенсивной эмиссии метана из-за активизации деградации мерзлоты и диссоциации ГГ в связи с потеплением климата на Земле [6; 8; 10—13].

В ряде наших предыдущих работ мы исследовали потенциальную газоносность ВЧР (залежи газа в свободном и гидратном состояниях) акваторий арктических и субарктических морей (Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского, Берингова и Охотского) на основе комплексного анализа данных двухмерной (2D) сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ) [17—23]. При этом было доказано

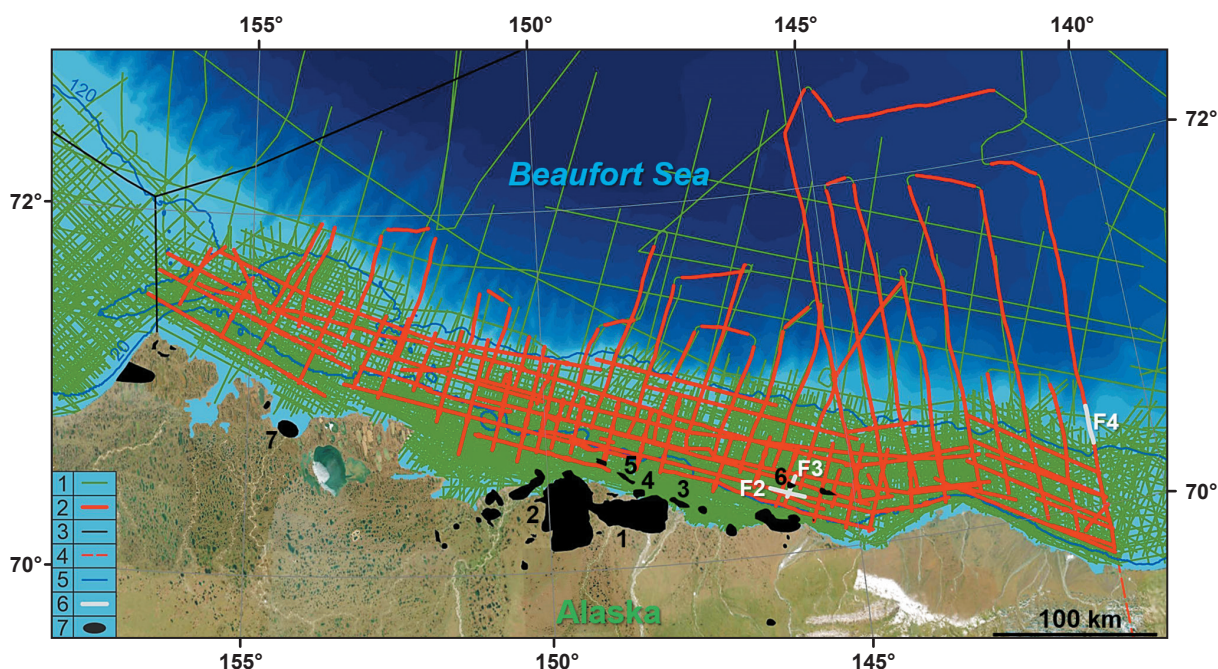


Рис. 1. Схема изучения американского сектора моря Бофорта на основе батиметрической базы GEBCO и космоснимка ESRI. Обозначения: 1 – сейсмoproфили МОГТ; 2 – проанализированные профили USGS; 3 – границы морей Бофорта и Чукотского; 4 – граница между США и Канадой на суше; 5 – изобаты (м); 6 – фрагменты временных разрезов, приведенные в статье на рис. 2 (F2), 3 (F3) и 4 (F4); 7 – месторождения углеводородов на схеме: 1 – Prudhoe Bay, 2 – Kuparuk River, 3 – Endicott, 4 – Point McIntyre, 5 – Northstar, 6 – Hammerhead, 7 – Tulimanig

Fig. 1. Study scheme of the US sector of the Beaufort Sea on the basis of the GEBCO bathymetric base and ESRI satellite image. 1 – CDP seismic lines; 2 – analyzed seismic sections of USGS; 3 – boundaries of the Beaufort and Chukchi seas; 4 – land border between the US and Canada; 5 – isobaths (m); 6 – fragments of seismic sections, presented in the paper in fig. 2 (F2), 3 (F3), 4 (F4); 7 – hydrocarbon fields on the scheme: 1 – Prudhoe Bay, 2 – Kuparuk River, 3 – Endicott, 4 – Point McIntyre, 5 – Northstar, 6 – Hammerhead, 7 – Tulimanig

широкое распространение неоднородностей в ВЧР, потенциально связанных с газонасыщенностью — газовыми карманами (gas pockets). Установлены закономерности пространственного распределения этих неоднородностей, включая среднее расстояние между ними, верхние границы предполагаемого газонасыщения и горизонтальные размеры. В частности, для западной части Восточно-Сибирского моря было показано, что среднее расстояние между потенциально газоносными объектами составило 63,6 км, что в 5,2—6,2 раза реже, чем в морях Чукотском, Лаптевых и Беринговом (расстояния соответственно 12,2, 11,4 и 10,3 км) [18—23]. Это хорошо согласуется с меньшей неотектонической активностью Восточно-Сибирского моря, меньшим количеством каналов миграции газа (разломов), выделяемых на временных разрезах МОГТ, и отсутствием значимых сейсмических событий.

Цель данной работы заключается в изучении потенциальной газоносности ВЧР в западном секторе моря Бофорта, в геологическом плане относящемся к Северному склону Аляски (ССА). Данная работа является логическим продолжением многолетних исследований авторов ряда акваторий Арктики и Дальнего Востока [17—23]. При этом, как и в исследованиях газоносности ВЧР Чукотского и Берингова морей [19; 20], использованы данные сейсмозондирования МОГТ 2D Геологической службы США (USGS).

Краткий нефтегазогеологический очерк

Море Бофорта является окраинной акваторией Северного Ледовитого океана, омывающей с севера берега Аляски (США) и континентальной части Канады. На востоке море ограничено островами Канадского Арктического архипелага, на северо-западе — условной линией от мыса Барроу на Аляске до острова Принс-Патрик [24]. Площадь моря составляет около 476 тыс. км², средняя глубина — 1004 м. Мелководный шельф протягивается вдоль берега узкой полосой шириной не более 145 км. На севере шельф ограничен континентальным склоном, переходящим в глубоководную Канадскую котловину с максимальными глубинами около 4 км (рис. 1). Большую часть года (9—10 месяцев) море Бофорта покрыто льдом.

Шельф Северной Аляски, включающий прилегающие секторы морей Чукотского и Бофорта, хорошо изучен сейсмозондировкой МОГТ (см. рис. 1 — более 1 пог. км/км²) и бурением. Это высокоперспективный нефтегазоносный регион с рядом крупных месторождений УВ, открытых во второй половине XX в. В ходе геологической эволюции в пределах региона сформировались осадочные бассейны, характеризующиеся различными углеводородными потенциалами в широком диапазоне литолого-стратиграфических комплексов от карбона до кайнозоя [25—31]. Осадочный чехол шельфа моря Бофорта сложен комплексами элсмирских (карбон-юра), бо-

фортовых/рифтовых (верхняя юра — нижний мел) и брукских (мел-кайнозой) отложений, проградирующих в северном направлении и залегающих на франклинском фундаменте (породы девонского и более древнего возраста). Для шельфа характерны листрические разломы и оползни, по которым отложения смещаются в сторону глубоководной Канадской котловины [25; 28]. В пределах шельфа известно наличие глиняных диапиров, деформировавших осадочный чехол [25]. Предположительно диапиры сложены породами юрского, мелового, палеоценового возрастов. Их образование связано с пониженной плотностью глиняных толщ по сравнению с перекрывающими комплексами.

В центральной части побережья США в 1967 и 1969 гг. были открыты два крупнейших месторождения США — Prudhoe Bay и Kuparuk River (см. рис. 1) с начальными извлекаемыми запасами нефти (1,95 и 0,41 млрд т) и газа (750 и 28 млрд м³), сосредоточенными преимущественно в песчаниках триаса [30; 31]. За 40-летний период разработки месторождения Prudhoe Bay накопленная добыча нефти по состоянию на начало 2019 г. превысила 1,73 млрд т (12,6 млрд барр.), что достигнуто благодаря применению новейших технологий [32].

На шельфе США открыто 23 месторождения УВ, при этом первое, Gwydyr Bay, было обнаружено в 1969 г. До недавнего времени самыми большими месторождениями на шельфе были разрабатываемые с 1987—2001 гг. Endicott (80 млн т нефти), Point McIntyre (83 млн т нефти и 17 млрд м³ газа) и Northstar (24 млн т нефти). Не вызывает сомнений возможность открытия новых крупных месторождений. В 2016 г. компания «Caelus Energy Alaska» открыла крупное месторождение Tulimaniq в заливе Смита (см. рис. 1) с предварительно оцененными извлекаемыми запасами легкой нефти около 275 млн т [33].

Методы исследований

Для изучения неоднородностей верхней части геологического разреза моря Бофорта использованы архивные временные разрезы МОГТ USGS по сейсмопрофилям на мелководном шельфе (объекты W-17-77-AR, W-18-77-AR, B-59-82-AR), а также на шельфе с прилегающим континентальным склоном (L-9-77-AR), отработанным с научно-исследовательского судна «S.P. Lee» с использованием группы из пяти пневмоисточников, 24-канальной сейсмокоды и цифровой сейсмостанции GUS (Global Universe Science) Model 4200 [34].

Анализ временных разрезов проводился в программном комплексе Kingdom (компания IHS, США). В ходе работы выделялись аномалии сейсмической записи, указывающие на возможные залежи газа в ВЧР (газовые карманы). Такие аномалии определяются по шести признакам, которые для краткости изложения в тексте указаны в цифровой индексации, принятой в предыдущих работах авторов [18—20; 22; 23]:

1) резкое локальное повышение амплитуды отражений («яркое пятно») над залежами;

2) инверсия фаз отражений (смена полярности);

3) прогибание осей синфазности отраженных волн под аномальными объектами, 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 предполагаемой залежью газа (пониженные амплитуды отражений);

6) наличие плоских осей синфазности, соответствующих отраженным волнам от газовой контактной поверхности.

Результаты исследований

Для выявления потенциальных залежей газа в ВЧР анализировались временные разрезы рейсов W-17-77-AR, W-18-77-AR и B-59-82-AR, характеризующиеся достаточно хорошим качеством. На рис. 2 приведен фрагмент временного разреза WB-013 (рейс W-17-77-AR) с двумя аномальными объектами в ВЧР. На участке А протяженностью около 1 км с центром на пикете 2420 на временах 0,15—0,55 с наблюдаются многоуровневые ярко выраженные аномалии отраженных волн в ВЧР, верхняя из которых расположена близко к морскому дну. Эти аномалии характеризуются пятью из шести отмеченных выше признаков: повышенными амплитудами отражений (1), инверсией фаз (2), прогибанием отражающих горизонтов (3), пониженными частотами (4) и зоной тени (5). На участке В с центром у пикета 2020 от морского дна до времени 0,5 с прослеживается зона деструкции осей синфазности, указывающая на возможный канал миграции газа. Вероятно, в этом месте происходит эмиссия газа в гидросферу, за счет чего на дне сформировался кратер выброса газа — покмарка (rockmark).

Ярко выраженные аномальные объекты в ВЧР выявлены на временных разрезах в сводовой части антиклинального поднятия на площади нефтяного месторождения Hammerhead, открытого в 1985 г. при бурении первой скважины Н1 [35; 36]. На рис. 3 приведен участок временного разреза WB-088 (рейс W-17-77-AR), пересекающий профиль WB-013 (места пересечения на рис. 2 и 3 обозначены красным крестом). На профиль WB-088 спроецировано положение скважины Н1, пробуренной примерно в 580 м к северо-западу. Скважина Н1 подтвердила наличие нефтеносных пластов на глубинах около 1605 и 1654 м относительно уровня моря (время около 1,6 с), а также газовых залежей в ВЧР на глубинах около 380, 410 и 533 м (времена около 0,4—0,6 с) [36]. Наличие газовых карманов в ВЧР привело к значительному искажению формы антиклинального поднятия во временном масштабе — прогибанию

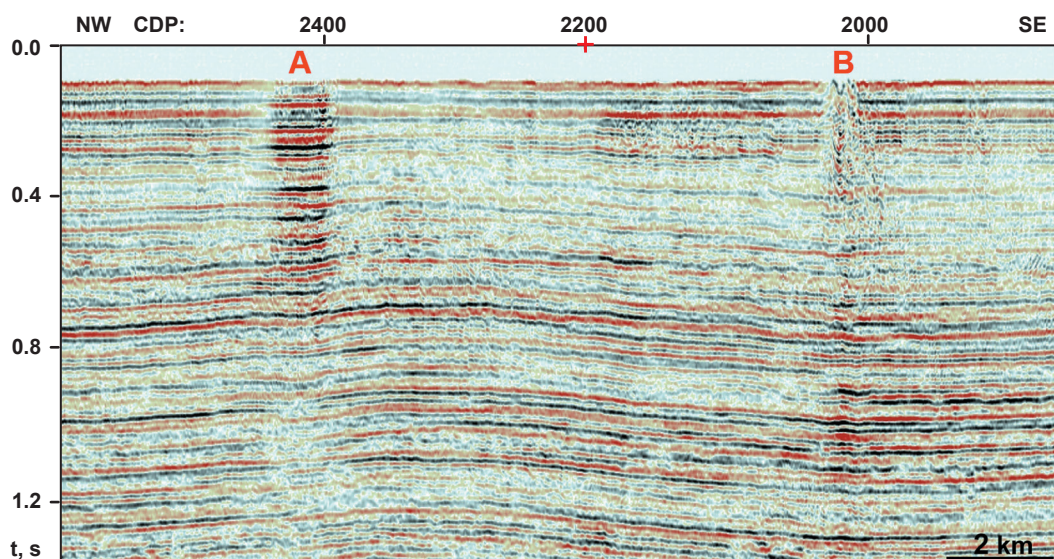


Рис. 2. Фрагмент временного разреза МОГТ WB-013 с аномальными объектами А и В в ВЧР (положение показано на рис. 1 – F2)
Fig. 2. Fragment of the CDP seismic section WB-013 with anomalous objects A and B in the upper part of the section (location is shown in fig. 1 – F2)

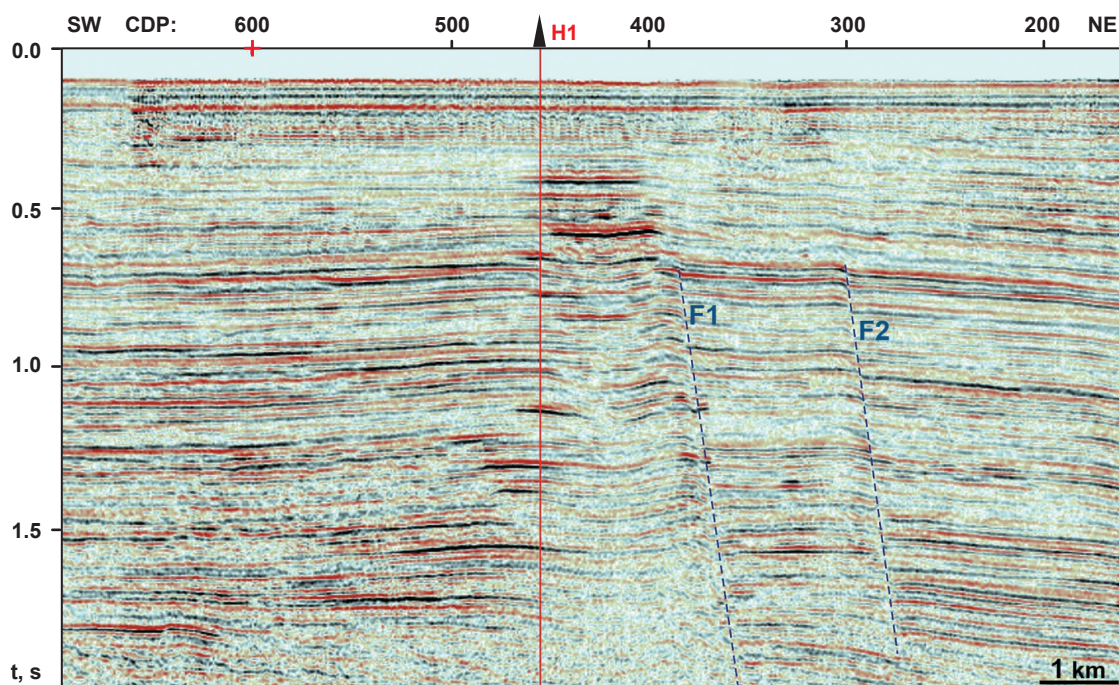


Рис. 3. Фрагмент временного разреза МОГТ WB-088 через антиклинальное поднятие месторождения Hammerhead со скважиной H1 (положение показано на рис. 1 – F3).
Fig. 3. Fragment of the CDP seismic section WB-088 over the anticline of the Hammerhead Field with the well H1 (location is shown in fig. 1 – F3)

нижележащих горизонтов (см. рис. 3). Наблюдаемые на пикетах 400—460 аномальные объекты в ВЧР протяженностью около 1,5 км характеризуются пятью из шести указанных выше признаков газоносности (1, 2, 3, 4, 5). На рис. 3 достаточно уверенно выделяются два разлома (F1 и F2), один из которых (F1) находится вблизи свода антиклинали. Предполагается, что газ мигрировал из глубоких продуктивных горизонтов в антиклинальной ловушке через

разлом F1 в ВЧР, где сформировал несколько залежей в песчаных резервуарах.

На многих временных разрезах из рейса L-9-77-AR, проходящих через континентальный склон, наблюдается отражающий горизонт BSR (bottom simulating reflector — псевдодонный отражающий горизонт), отождествляемый с подошвой зоны стабильности ГГ, экранирующей залежи газа в свободном состоянии [12; 18]. Для иллюстрации сказанного на рис. 4 при-

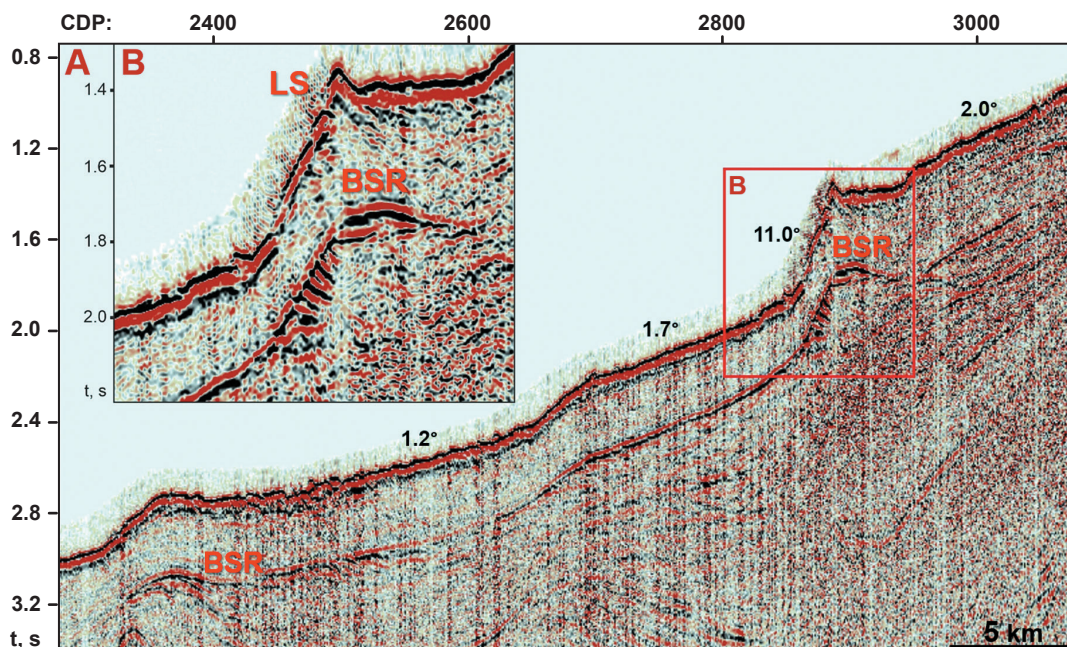


Рис. 4. Участок временного разреза МОГТ 716 с горизонтом BSR (A) и его увеличенный фрагмент (B) в районе оползня (LS) (положение показано на рис. 1 – F4)

Fig. 4. Fragment of the CDP seismic section 716 with the BSR horizon (A) and its enlarged fragment (B) over the landslide (LS) (location is shown in fig. 1 – F4)

веден участок временного разреза 716 в глубоководной (0,7—2,3 км) части пологого склона (преимущественные углы наклона дна 1,2—2,0°) с выделяемым горизонтом BSR, который начинает прослеживаться у бровки континентального шельфа (пикет 3030, время 1,5 с) и прекращается у подножья склона (пикет 2330, время 3,2 с). На временном разрезе наблюдается субпараллельность горизонта BSR поверхности морского дна, при этом его оси синфазности имеют обратную полярность, обусловленную отражением от кровли экранируемых толщ ГГ газонасыщенных отложений с пониженной скоростью. На увеличенном фрагменте разреза в районе оползня (LS) видно пересечение горизонтом BSR слоистости придонных отложений, деформированных оползнем. Отметим факт образования оползней при пологих углах наклона дна даже при 1,2°, что свидетельствует о низкой консолидации донных отложений.

Всего по акватории моря Бофорта было рассмотрено 112 временных разрезов МОГТ общей протяженностью около 8440 км. При анализе строения ВЧР 4050 км 52 разрезов мелководья шельфа (съемки W-17-77-AR, W-18-77-AR, B-59-82-AR) выделено 184 аномальных объекта (рис. 6), при этом среднее расстояние между ними составило около 22 км. Это расстояние почти вдвое выше определенного ранее для Чукотского моря (12,2 км) [20]. При анализе 4390 км 60 временных разрезов съемки L-9-77-AR, пересекающих шельф и континентальный склон, горизонт BSR был выделен на 22 разрезах (см. рис. 5).

Для предполагаемых газовых карманов была выполнена статистическая оценка их распределения

в ВЧР по горизонтальным размерам и глубинам относительно морского дна. При этом из-за низкой разрешенности сейсмических данных глубины определялись для верхних границ предполагаемого газонасыщения. Результаты расчетов приведены на рис. 6 в сопоставлении с аналогичными данными для соседней акватории Чукотского моря, полученными в нашем предыдущем исследовании [20].

Обсуждение результатов

В западной части моря Бофорта и в северо-восточной части Чукотского моря наличие в ВЧР залежей газа в свободном состоянии как на мелководном шельфе, так и на его склоне подтверждается отчетом [25]. На мелководном шельфе высокие концентрации газа в ВЧР в основном связаны с погребенными дельтой и каналами плейстоценового возраста, а также с действующими разломами — каналами миграции глубинного газа.

Приведенные на рис. 6 результаты анализа горизонтальных размеров аномальных объектов и глубин залегания их верхних частей относительно морского дна для морей Бофорта и Чукотского в целом свидетельствуют об их подобии. Большинство объектов на акватории моря Бофорта (82,6%) имеют протяженность вдоль профилей до 1,5 км, что схоже со статистикой для Чукотского моря (78,5%) (см. рис. 6A). При этом размеры менее 500 м в море Бофорта имеют 38% объектов, а в Чукотском море — 39,4%. По глубине расположения верхних частей аномальных объектов максимальное количество приходится на глубины до 100 м: в море Бофорта — 66,8%, в Чукотском море — 57,5%.

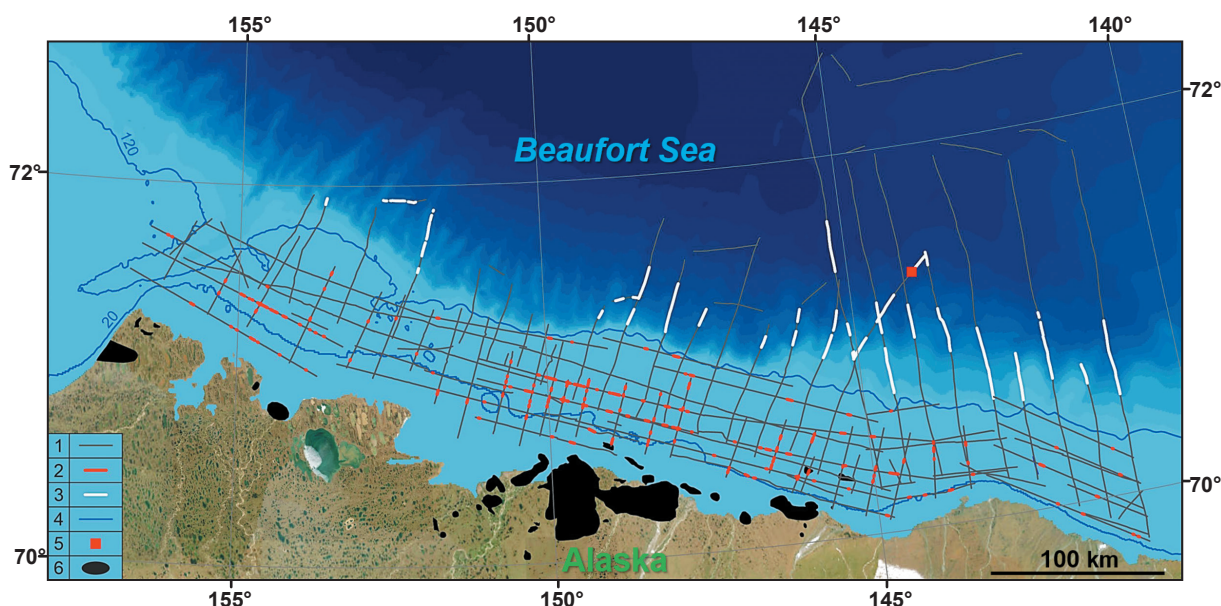


Рис. 5. Результаты интерпретации временных разрезов МОГТ USGS. Обозначения: 1 – положение проанализированных сейсмопрофилей, 2 – потенциально газонасыщенные объекты в ВЧР, 3 – горизонт BSR, 4 – изобаты (м), 5 – CSM – донное поднятие Каннинг [38], 6 – месторождения углеводородов. Картографическая основа – батиметрическая база GEBCO и космоснимок ESRI

Fig. 5. Results of the USGS CDP seismic sections interpretation. Legend: 1 – location of the analyzed seismic sections, 2 – potentially gas-saturated objects in the upper part of the section, 3 – BSR horizon, 4 – isobaths (m), 5 – CSM – Canning Seafloor Mound [38], 6 – hydrocarbon fields. Cartographic base – GEBCO bathymetric base and ESRI satellite image

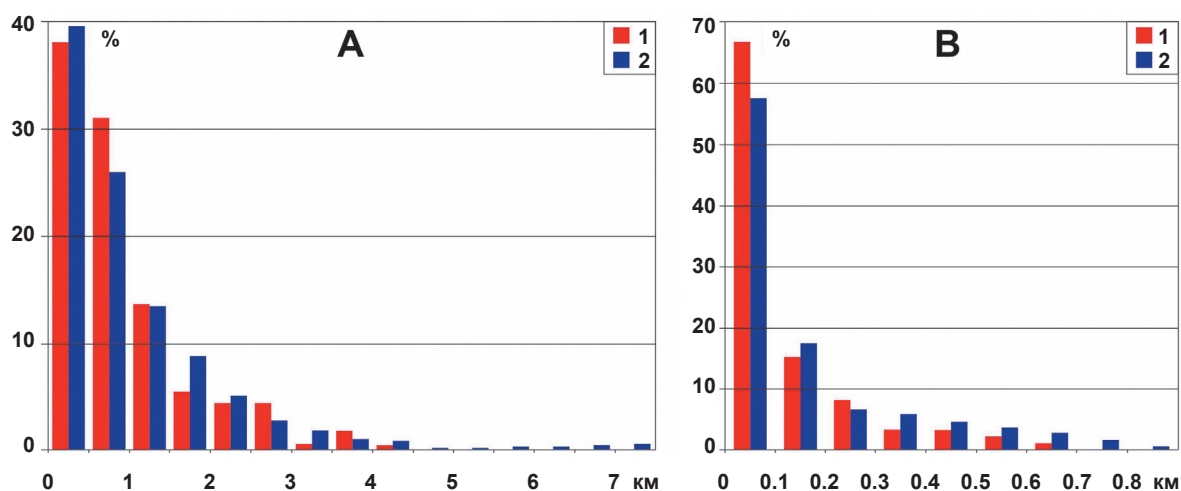


Рис. 6. Распределение потенциально газонасыщенных объектов в ВЧР по горизонтальным размерам (А) и по глубинам верхних границ (В) в морях Бофорта (1) и Чукотском (2)

Fig. 6. Distribution of potentially gas-saturated objects in the upper part of the section by horizontal size (A) and depths of upper boundaries (B) in the Beaufort (1) and Chukchi (2) seas

Схожие распределения по горизонтальным размерам для морей Бофорта и Чукотского указывают на общие закономерности генерации, миграции, аккумуляции УВ в ВЧР, а также на близкие литологические характеристики природных резервуаров, что обусловлено единой историей геологического развития Северной Аляски и прилегающего шельфа. Приуроченность наибольшего количества аномалий к приповерхностной зоне ВЧР свидетельствует о новейшей тектонической активности, при которой разломы нередко доходят до морского дна. Аляска

и прилегающий шельф в целом характеризуются высокой сейсмической активностью [25].

Аномальные объекты в ВЧР, потенциально обусловленные наличием газовых залежей, выделяются в широком диапазоне глубин дна моря, включая мелководную (до 20–25 м) зону прогнозного существования субаквальной мерзлоты на удалениях от берега до 30 км, подтвержденной бурением [13; 37; 38] и данными анализа скоростей распространения преломленных волн в придонных отложениях [39]. При этом не исключено, что часть газовых карманов

на мелководье существует в гидратном состоянии, например, на месторождении Hammerhead [36].

Возможное существование ГГ на континентальном склоне Аляски в море Бофорта ранее было исследовано по наличию горизонта BSR в работах [38; 40—43]. Результаты нашей интерпретации сейсмических разрезов рейса L-9-77-AR (см. рис. 5) согласуются с предыдущими исследованиями (лучше всего — с данными [42]).

Считаем важным отметить, что на временном разрезе 725 (рейс L-9-77-AR) в глубоководной (около 2,5 км) части континентального склона моря Бофорта наблюдается поднятие в рельефе дна (высота 130 м, диаметр основания около 1,1 км), названное исследователями USGS CSM (Canning Seafloor Mound — Донное поднятие Каннинг) [38]. В 2010 г. в пробах донных отложений на данной структуре были обнаружены ГГ, при этом горизонт BSR не прослеживается. Предполагается, что важным фактором образования CSM является наличие разрывных нарушений под ним, позволяющих пластовой воде и газу мигрировать из глубоководных горизонтов. Поступление относительно теплых пластовых флюидов могло являться причиной локальной диссоциации ГГ, хотя на соседних участках горизонт BSR существует. У нас не вызывает сомнений газодинамический механизм формирования CSM, при этом представляется наиболее вероятным прогноз [38], что этот объект является грязевым вулканом, подобным обнаруженным в канадском секторе моря Бофорта [13] и Наакоп Mosby в Норвежском море [43].

Заключение

Впервые выполнен анализ потенциальной газонасыщенности ВЧР на шельфе моря Бофорта по архивным временным разрезам МОГТ USGS (съемки W-17-77-AR, W-18-77-AR, B-59-82-AR) по 52 сейсмопрофилям общей протяженностью 4050 км. По комплексу интерпретационных признаков выделено 184 аномальных потенциально газонасыщенных объекта, при этом среднее расстояние между ними составило около 22 км. Это расстояние почти в два раза больше определенного ранее для Чукотского моря (12,2 км), что, возможно, связано с меньшей дислоцированностью ВЧР в море Бофорта, а также с его меньшей тектонической активностью. В результате статистического анализа горизонтальных размеров и глубин залегания верхних границ предполагаемого газонасыщения выявлено, что большинство объектов в море Бофорта находится на глубинах до 200 м (82,1%) и имеет горизонтальные размеры до 1,5 км (82,6%). Данное распределение аномальных объектов близко к ранее выявленному для соседнего Чукотского моря, что может объясняться схожими геологическими и современными геокриологическими условиями данных акваторий.

При анализе временных разрезов МОГТ съемки L-9-77-AR по пересекающим шельф и континентальный склон 60 сейсмопрофилям общей протяженностью 4390 км по наличию горизонта BSR

прогнозируется существование газогидратов на 22 разрезах на 39 участках на континентальном склоне. Зона распространения горизонта BSR согласуется с ранее опубликованными данными [38; 42]. Также проанализировано ранее выявленное газогидратоносное Донное поднятие Каннинг (CSM) [38], генезис которого, наиболее вероятно, связан с грязевым вулканизмом.

На временных разрезах USGS на континентальном склоне моря Бофорта в секторах США и Канады, а также на дне других акваторий Арктики, в рельефе дна выделяются многочисленные локальные поднятия — потенциальные и подтвержденные грязевые вулканы. Проблема распространения грязевого вулканизма на шельфе и суше Арктики находится на начальной стадии изученности и требует расширения специально ориентированных работ, что позволит уточнить объемы эмиссии метана в северных широтах.

Полученные результаты показывают важность исследований ВЧР арктических морей по архивным и новым сейсмическим материалам, позволяющих получать дополнительную информацию о распространении УВ в осадочном чехле и оценивать природные опасности, представляющие угрозу при поиске и освоении морских месторождений.

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).

Авторы признательны Геологической службе США (USGS) за предоставленную возможность использования материалов сейсмозаземки МОГТ 2D по западной части акватории моря Бофорта.

Литература/References

1. Анисимов О. А., Зимов С. А., Володин Е. М., Лавров С. А. Эмиссия метана в криолитозоне России и оценка ее воздействия на глобальный климат // Метеорология и гидрология. — 2020. — № 5. — С. 131—143.
2. Anisimov O. A., Zimov S. A., Volodin E. M., Lavrov S. A. Methane Emission in the Russian Permafrost Zone and Evaluation of Its Impact on Global Climate. Russian Meteorology and Hydrology, 2020, vol. 45, pp. 377—385.
3. James R. H., Bousquet P., Bussmann I., Haeckel M., Kipfer R., Leifer I. et al. Effects of climate change on methane emissions from seafloor sediments in the Arctic Ocean: A review. Limnology and Oceanography, 2016, vol. 61 (S1), pp. S283—S299. DOI: 10.1002/lno.10307.
4. Etiope G., Ciotoli G., Schwietzke S., Schoell M. Grid- ded maps of geological methane emissions and their isotopic signature. Earth System Science Data, 2019, vol. 11 (1), pp. 1—22. Available at: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1-2019>.
5. Saunio M., Stavert A. R., Poulter B., Bousquet P., Canadell J. G., Jackson R. B., Raymond P. A. et al. The Global Methane Budget 2000—2017. Earth Syst. Sci. Data,

- 2020, vol. 12, pp. 1561—1623. Available at: <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.
5. *Dlugokencky Ed.* Global CH₄ Monthly Means. NOAA/GML, 2022. Available at: gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/.
6. Сергиенко В. И., Лобковский Л. И., Семилетов И. П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Докл. Акад. наук. — 2012. — Т. 446, № 3. — С. 330—335.
- Sergienko V. I., Lobkovsky L. I., Semiletov I. P. et al.* The degradation of submarine permafrost and the destruction of hydrates on the shelf of east arctic seas as a potential cause of the “Methane Catastrophe”: some results of integrated studies in 2011. *Doklady Earth Sciences*, 2012, vol. 446 (1), pp. 1132—1137.
7. Шакиров Р. Б. Газогеохимические поля окраинных морей Восточной Азии. — М.: ГЕОС, 2018. — 341 с.
- Shakirov R. B.* Gasgeochemical fields of the Eastern Asia marginal seas. — Moscow, GEOS Publ., 2018. — 341 p. (In Russian).
8. *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, iss. 6341, pp. 948—953. DOI: 10.1126/science.aal450.
9. *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-Marine Letters*, 2020, vol. 40, pp. 541—557. DOI: 10.1007/s00367-020-00655-7.
10. *Ginsburg G. D., Milkov A. V., Soloviev V. A., Egorov A. V. et al.* Gas hydrate accumulation at the Håkon Mosby Mud Volcano. *Geo-Mar. Lett.*, 1999, no. 19, pp. 57—67.
11. *Judd A., Hovland M.* Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. Cambridge, Univ. Press, 2007, 493 p.
12. *Kvenvolden K. A.* Methane hydrates and global climate. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 1988, vol. 2, pp. 221—229.
13. *Paull C. K., Dallimore S. R., Caress D. W. et al.* Active mud volcanoes on the continental slope of the Canadian Beaufort Sea. *AGU — Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, vol. 16 (9), pp. 3160—3181. DOI: 10.1002/2015GC005928.
14. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Гор. пром-сть. — 2020. — № 1 (149). — С. 97—118.
- Bogoyavlensky V. I.* Natural and technogenic threats in fossil fuels production in the Earth cryolithosphere. *Gornaya promyshlennost'/Russian Mining Industry*, 2020, no. 1 (149), pp. 97—118. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118. (In Russian).
15. Богоявленский В. И. Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 51—66.
- Bogoyavlensky V. I.* Fundamental aspects of the catastrophic gas blowout genesis and the formation of giant craters in the Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 51—66. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-51-66. (In Russian).
16. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Kargina T., Chuvilin E., Bukhanov B., Umnikov A.* New Catastrophic Gas Blowout and Giant Crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the Expedition and Data Processing. *Geosciences*, 2021, vol. 11 (2), pp. 1—20. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences11020071>.
17. 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. Y., 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).
18. 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—28.
- 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).
19. 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).
20. 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).
21. Богоявленский В. И., Кишанков А. В., Казанин А. Г. Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых // Докл. Рос. акад. наук. Науки о Земле. — 2021. — Т. 500, № 1. — С. 83—89. — DOI: 10.31857/S2686739721090048.
- Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G.* Permafrost, Gas Hydrates and Gas Seeps in the Central Part of the Laptev Sea. *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 500, pp. 766—771. DOI: 10.1134/S1028334X2109004X.
22. 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. Науки 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.
23. 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. 157—171. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-158-171. (In Russian).
24. Encyclopaedia Britannica. Available at: <https://www.britannica.com/>.
25. Grantz A., Dinter D. A., Hill E. R., May S. D., McMullin R. H., Phillips R. L., Reimnitz E. Geologic framework, hydrocarbon potential, and environmental conditions for exploration and development of proposed oil and gas lease sale 87 in Beaufort and northeast Chukchi Seas; a summary report (No. 82-482). US Geological Survey, 1982.
26. Grantz A., May S. D., Hart P. E. Geology of the Arctic continental margin of Alaska. *The Geology of North America*, 1990, vol. 50, pp. 257—288.
27. Grantz A., Hart P. E., Childers V. A. Geology and tectonic development of the Amerasia and Canada Basins, Arctic Ocean. Geological Society, London. *Memiors*, 2011, vol. 35, no. 1, pp. 771—799.
28. Houseknecht D. W., Bird K. J. Oil and gas resources of the Arctic Alaska petroleum province. US Geological Survey Professional Paper 1732-A, 2006, pp. 1—11. Available at: <http://pubs.usgs.gov/pp/pp1732a/>.
29. Haimila N. E., Kirschner C. E., Nassichuk W. W., Ullmishek G., Procter R. M. Sedimentary basins and petroleum resource potential of the Arctic Ocean region. *The Arctic Ocean Region*, Chap. 27, 1990, vol. 50, pp. 503—538.
30. 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. — С. 16—27.
Laverov N. P., Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V. Seismic exploration and development of offshore oil and gas fields in the Arctic of the Western Hemisphere. Arctic: Ecology and Economy, 2011, no. 3, pp. 16—27. Available at: <http://arctica-ac.ru/article/418/>. (In Russian).
31. Богоявленский В. И., Полякова И. Д., Будагова Т. А., Богоявленский И. В., Данилина А. Н. Геолого-геофизические исследования нефтегазоносности 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).
32. Milam K. BP Celebrates 40 Years of Production in Alaska's Prudhoe Bay. AAPG Explorer, February 2019. Available at: <https://explorer.aapg.org/story/articleid/51286/bp-celebrates-40-years-of-production-in-alaskas-prudhoe-bay>.
33. Bailey A. Company is acquiring leases with intention to appraise major oil find. *Petroleum news*, 2021, vol. 26, no. 4. Available at: <https://www.petroleumnews.com/pntruncate/723610240.shtml>.
34. Triezenberg P. J., Hart P. E., Childs J. R. National Archive of Marine Seismic Surveys (NAMSS): A USGS data website of marine seismic reflection data within the U.S. Exclusive Economic Zone (EEZ): U.S. Geological Survey Data Release, 2016. DOI: 10.5066/F7930R7P.
35. Banet A. C. Oil and gas development of Alaska's North Slope: Past results and future prospects. Open file report 34. Bureau of Land Management Alaska State office. Anchorage, Alaska, 1991, 42 p.
36. Collett T. S., Lee M. W., Avena W. F., Miller J. J., Lewis K. A., Zyrianova M. V. et al. Permafrost-associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, vol. 28 (2), pp. 279—294.
37. Sellmann P. V., Chamberlain E. J. Permafrost beneath the Beaufort Sea: Near Prudhoe Bay, Alaska. Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, April 1979. Paper number: OTC-3527-MS, 1979. Available at: <https://www.doi.org/10.4043/3527-MS>.
38. Hart P. E., Pohlman J. W., Lorenson T. D., Edwards B. D. Beaufort Sea deep-water gas hydrate recovery from a seafloor mound in a region of widespread BSR occurrence. *Proceedings of the 7th International conference on gas hydrates (ICGH 2011)*, Edinburgh, Scotland, 2011.
39. Brothers L. L., Hart P. E., Ruppel C. D. Minimum distribution of subsea ice-bearing permafrost on the US Beaufort Sea continental shelf. *Geophysical research letters*, 2012, vol. 39, no. 15. Available at: <https://doi.org/10.1029/2012GL052222>.
40. Grantz A., Hart P. E., Kvenvolden K. A. Seismic reflection character, distribution, estimated volume and stability of gas hydrate deposits beneath the Arctic Ocean north of Alaska. *EOS, Transactions of the American Geophysical Union*, 1989, vol. 70, p. 1152.
41. Kvenvolden K. A., Grantz A. Gas hydrates of the Arctic Ocean region. *The Arctic Ocean Region (Geol. North Am., L)*, Colo. Geol. Soc. Am., 1990, pp. 539—549.
42. 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.
43. Vogt P. R., Cherkashev G., Ginsburg G., Ivanov G., Vilkov A. et al. Haakon Mosby mud volcano provides unusual example of venting. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 1997, vol. 78, no. 48, pp. 549—557.

Информация об авторах

Богоявленский Василий Игоревич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, 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, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

Библиографическое описание данной статьи

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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-201-210.

DANGEROUS GAS-SATURATED OBJECTS IN THE WORLD OCEAN: THE BEAUFORT SEA, ALASKA NORTH SLOPE SHELF

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

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

The article was received on February 17, 2023

Abstract

The article is devoted to the study of gas saturation of the upper part of the sedimentary cover in the western sector of the Beaufort Sea adjacent to Alaska. For the first time, the interpretation of the upper part of the seismic sections of CDP (common depth point) seismic survey was performed for 52 seismic lines of the United States Geological Survey (USGS) with a total length of 4050 km. 184 anomalous objects were found in near-bottom sediments, potentially associated with shallow gas accumulations (gas pockets). The average distance between these objects along the seismic lines was 22 km, which is 80% more than in the Chukchi Sea. This is apparently due to less tectonic activity in the Beaufort Sea. The statistically established similarity of anomalous objects in these seas in terms of depths and lengths is due to similar geological conditions for the formation of sedimentary deposits. In addition, 60 seismic lines with a total length of 4390 km show a wide distribution of potential gas hydrate deposits on the continental slope of the Beaufort Sea, which is consistent with the earlier conclusions of the US and Norwegian scientists (K. Andreassen, P. E. Hart, A. Grantz and others).

Keywords: World Ocean, the Beaufort Sea, the Chukchi Sea, Alaska North Slope, CDP seismic, near-surface section, gas accumulations, gas pockets, gas blowout craters, mud volcanoes, gas hydrates.

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).

The authors are grateful to the United States Geological Survey (USGS) for the opportunity to use 2D CDP seismic data for the western area of the Beaufort Sea.

Information about the authors

Bogoyavlensky, Vasily Igorevich, Doctor of Technical Science, Corresponding member of RAS, Deputy Director for Science, Chief Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: geo.ecology17@gmail.com.

Kishankov, Aleksei Vladimirovich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

Bibliographic description of the article

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).

© Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., 2023