

УДК 553.98+548.562(268.56)+551.34

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОДМЕРЗЛОТНОГО ГАЗОГИДРАТНОГО РЕЗЕРВУАРА НА ПРИТАЙМЫРСКОМ ШЕЛЬФЕ КАРСКОГО МОРЯ (ВОСТОЧНАЯ АРКТИКА, РОССИЯ)

© 2024 г. Т. В. Матвеева^{1,*}, А. О. Чазов^{1,2}, Ю. Ю. Смирнов^{1,3}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового Океана им. акад. И.С. Грамберга (ВНИИОкеангеология), Английский пр., д. 1, 190121 Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет – Институт наук о Земле, Университетская наб., д. 7–9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

³Российский государственный гидрометеорологический университет, Воронежская ул., д. 79, 192007 Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: tv_matveeva@mail.ru

Поступила в редакцию 12.10.2023 г.

После доработки 10.11.2023 г.

Принята в печать 24.11.2023 г.

В статье рассмотрены условия образования газовых гидратов, связанных с реликтами мерзлых пород в Карском море. Прогноз распространения реликтовой мерзлоты и обусловленной ей зоны стабильности метановых гидратов выполнен на основе численного моделирования путем решения уравнения теплопроводности. По данным моделирования для шельфа Карского моря прогнозируется обширная термобарическая зона реликтовой подводной мерзлоты, наибольшие мощности которой (до 600 м) приурочены к Притаймырскому шельфу. По результатам анализа модельных, буровых и сейсморазведочных данных, юго-западный шельф Карского моря характеризуется островной мерзлотой. На северо-восточном шельфе характер мерзлоты также прерывистый, несмотря на большие мощности мерзлых толщ. Впервые охарактеризован криогенный газогидратный резервуар на Притаймырском шельфе. Данные сейсморазведки и численного моделирования показали приуроченность газогидратного резервуара к несогласию залегающим силурийско–девонским и подстилающим их триасово–юрским толщам. Однако по новейшим данным бурения возрастная привязка, по всей вероятности, может быть скорректирована как ордовикско–девонская, триасово–юрская. Толщина газогидратного резервуара варьирует от 800 до 1100 м. На основе интерпретации данных МОВ ОГТ, данных бурения и сопоставления их с модельными расчетами зоны стабильности метановых гидратов впервые охарактеризован резервуар криогенных газовых гидратов, а также определены его мощности, морфология, дана предварительная сейсмостратиграфическая привязка, выявлены мерзлые отложения и подмерзлотные ловушки стратиграфического, сводового и сводово-стратиграфического типов. Из-за благоприятных термобарических и мерзлотно-геотермических условий большинство выявленных ловушек могут оказаться подмерзлотными скоплениями гидратов. Всего обнаружено пять потенциальных скоплений гидратов, приуроченных к структурным депрессиям – прогибу Уединения и его борту, состоящему из ступени Егизарова и Северо-Михайловской депрессии.

Ключевые слова: Восточная Арктика, Карское море, Притаймырский шельф, реликтовая подводная мерзлота, криогенные газовые гидраты, скопления газовых гидратов, газогидратный резервуар, зона стабильности газовых гидратов, численное моделирование, сейсморазведка, сейсмические атрибуты

DOI: 10.31857/S0016853X24020053, EDN: EAFJVV

ВВЕДЕНИЕ

Газовые гидраты – льдоподобные соединения молекул газа и воды, образующиеся под действием ван-дер-ваальсовых сил в условиях относительно высоких давлений и низких температур. В природных обстановках самым распространенным газом-гидратообразователем является метан. В одном объеме гидрата метана может содержаться до 164 объемов газа, что объясняет интерес к газовым гидратам как к топливу будущего (первые эксперимен-

ты уже осуществлены) [44, 55]. С другой стороны, в связи со способностью газовых гидратов содержать в компактной форме значительные количества метана, предполагается, что газовые гидраты разлагаясь могут вносить свой вклад в глобальное потепление климата [53, 63]. С позиции фундаментальной науки газовые гидраты являются одним из компонентов океанического литогенеза и глобального цикла углерода на Земле.

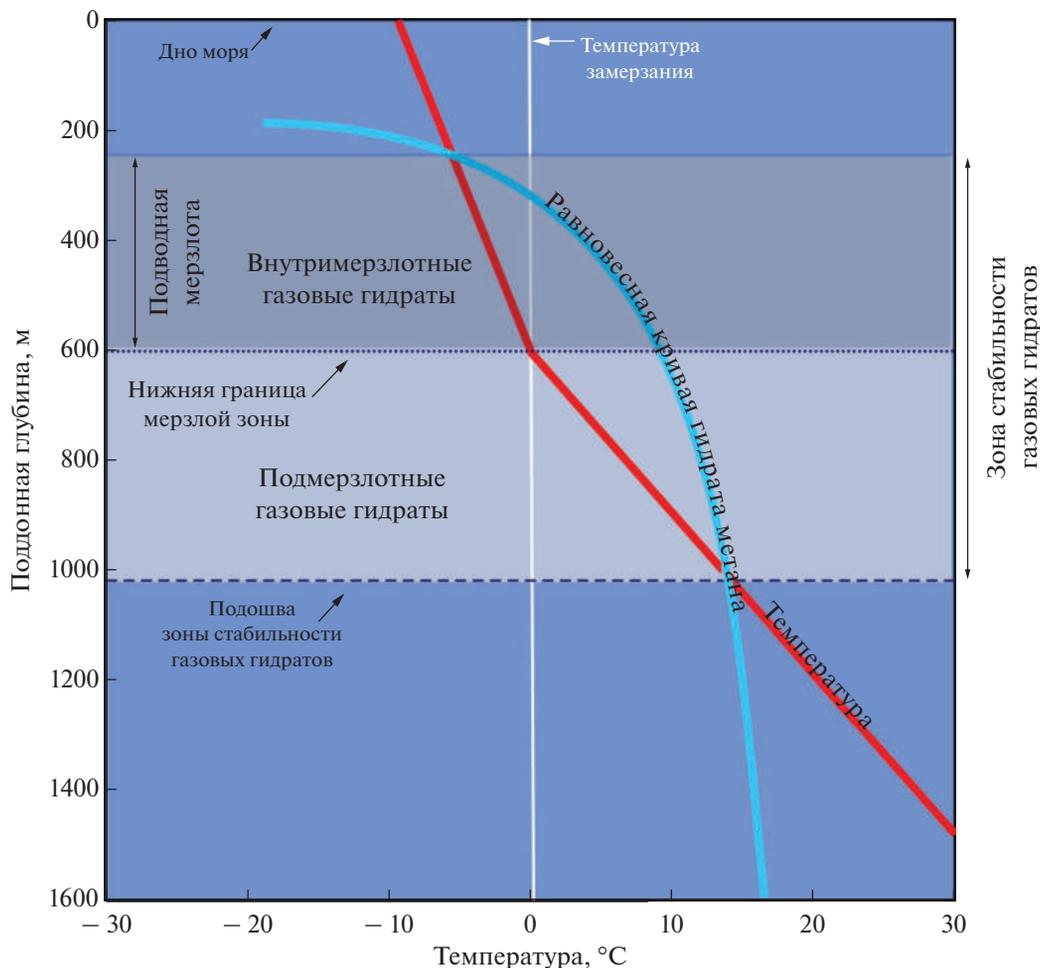


Рис. 1. Диаграмма равновесных условий стабильности гидратообразования (температура, давление) для определения зоны стабильности гидрата метана, обусловленной субаквальной реликтовой мерзлотой.

Образование субмаринных газовых гидратов в большинстве случаев приурочено к обстановкам, где есть миграция свободного или водорастворенного газа в зону стабильности газовых гидратов. Условия стабильности газовых гидратов различного состава описываются экспериментальными равновесными кривыми в $P-T$ осях. В субмаринных условиях параметр давления подменяется давлением столба воды (глубиной моря), а температура — геотермическим градиентом, описывающим поступление тепла из недр (рис. 1).

Даже незначительные изменения термобарических условий могут изменить параметры зоны стабильности газовых гидратов (ЗСГГ) и привести к разложению твердых газовых гидратов на газ и воду и вызвать разгрузку газа на морском дне.

Особенностью мелководных арктических шельфов является формирование газовых гидратов по криогенетической модели, которая связывает образование скоплений газовых гидратов с субмаринной мерзлотой [6] (см. рис. 1).

Активизация восходящих тектонических движений на шельфе арктических морей в позднем кайнозое обусловила колебания уровня моря, следствием чего явились неоднократные смены регрессивных и трансгрессивных циклов. В истории развития криолитозоны Западноарктического шельфа и палеошельфа можно выделить три основных этапа [15, 17, 23, 30, 31, 35]:

- плейстоценовые трансгрессии;
- позднеплейстоценовые (предголоценовые) регрессии;

– позднеплейстоцен–голоценовые трансгрессии.

Первый этап плейстоценовых трансгрессий, охватывающий время с эоплейстоцена до второй половины позднего плейстоцена, характеризовался преимущественно неблагоприятными для формирования субмаринной мерзлой зоны условиями из-за обширных трансгрессий. В западном секторе Арктики морские воды проникали далеко на юг.

Второй этап позднеплейстоценовых (предголоценовых) регрессий был оптимальным для глубо-

кого промерзания практически всего современного шельфа. Обнаженные в процессе отступления моря участки шельфа, подверглись субэаральному промерзанию. В ходе формирования мерзлоты, существующие залежи газа могли трансформироваться в скопления газовых гидратов [6, 31, 42].

Третий завершающий этап позднеплейстоцен–голоценовых трансгрессий, который начался приблизительно 19–18 тыс. лет назад, характеризовался постепенной сменой субэаральной обстановки на субаквальную. Термоабразия и деградация мерзлой зоны были важнейшими сопутствующими трансгрессии процессами. В ходе голоценовой трансгрессии, связанной с быстрым эвстатическим подъемом уровня Мирового океана, который в интервале времени от 19–18 до 7–5 тыс. лет назад проходил со средней скоростью около 0.6 см/год, абразией и термоабразией была переработана значительная толща сформировавшихся ранее отложений различного генезиса и возраста, переведены в субаквальное положение мерзлые породы, образованные при субэаральном промерзании. Таким образом, возникла обстановка, благоприятная для сохранения реликтов подводной мерзлоты, с которыми и связано формирование условий стабильности для криогенных газовых гидратов в настоящее время.

Наличие реликтов подводной мерзлоты (РПМ) в морских отложениях понижает положение нулевой изотермы, что обуславливает распространение отрицательных температур на более глубокие горизонты поддонного разреза и, соответственно, формирование зоны стабильности криогенных газовых гидратов. Таким образом, пониженные температуры благодаря наличию реликтов подводной мерзлоты позволяют газогидратам оставаться стабильными на суше и арктическом мелководье, а мощность зоны стабильности газовых гидратов здесь напрямую зависит от толщины вышележащего слоя вечной мерзлоты [64].

Данные каротажа, сейсмозаземки и бурения скоплений газовых гидратов в дельте Маккензи и на Северном склоне Аляски показывают, что гидраты газа, связанные с вечной мерзлотой, приурочены, в основном, к высокопроницаемым горизонтам под зоной реликтов подводной мерзлоты (подмерзлотные скопления), реже – к нижней части зоны (внутримерзлотные скопления) [41, 42].

Подводная мерзлота на шельфе Карского моря довольно хорошо изучена бурением, а также сейсмоакустическим профилированием [16, 20–26,

61, 62]. Однако все подобные изыскания сконцентрированы в юго-западной части акватории.

По данным численного моделирования опубликовано большое количество недавних прогнозов площадного распространения подводной мерзлоты на шельфе Карского моря [39, 47, 57, 60]. В работе [57] прогнозировалась также ЗСГГ. Однако ни в одной из опубликованных работ не имеется данных о положении кровли мерзлых отложений и кровли ЗСГГ. Хотя именно положение границ подводной мерзлоты и зоны стабильности имеет принципиально важное значение при характеристике резервуара криогенных гидратов газа.

На Евразийском арктическом шельфе криогенные скопления газовых гидратов неизвестны, хотя он и является самым обширным с широким распространением подводной мерзлоты. Изучения газогидратных резервуаров с выделением локальных потенциально газогидратоносных структур, связанных с мерзлотой, на шельфе арктических морей России ранее не проводилось. Северо-Карский шельф в отношении мерзлоты все еще слабо изучен с низкой надежностью имеющихся данных по реликтам подводной мерзлоты.

Газогидратоносность этого региона не подтверждена геолого-геофизическими работами и ранее оценивалась в рамках глобальных прогнозов на основе термобарических или палеоклиматических и мерзлотно-геотермических условий [57, 60]. Однако наличие на определенных глубинах условий стабильности газогидратов не означает, что они сформировались в осадочном чехле. Для более обоснованного прогноза необходим анализ геологического строения в общем (региональном) плане с точки зрения перспектив нефтегазоносности и рассмотрение таких элементов нефтегазоносных систем, как коллекторы и флюдопроводники, а также ловушки, купольная тектоника.

Таким образом, газогидратный резервуар включает зоны:

- стабильности газогидратов;
- сохранения реликтов подводной мерзлоты;
- развития мощных осадочных толщ, обладающих высокими газо-генерационными, емкостными и фильтрационными свойствами в той части осадочного разреза, который входит в зону стабильности газогидратов.

Зоны стабильности газогидратов и сохранения реликтов подводной мерзлоты генетически связаны. Газогидратные резервуары имеют ряд отличий от резервуаров традиционных углеводо-

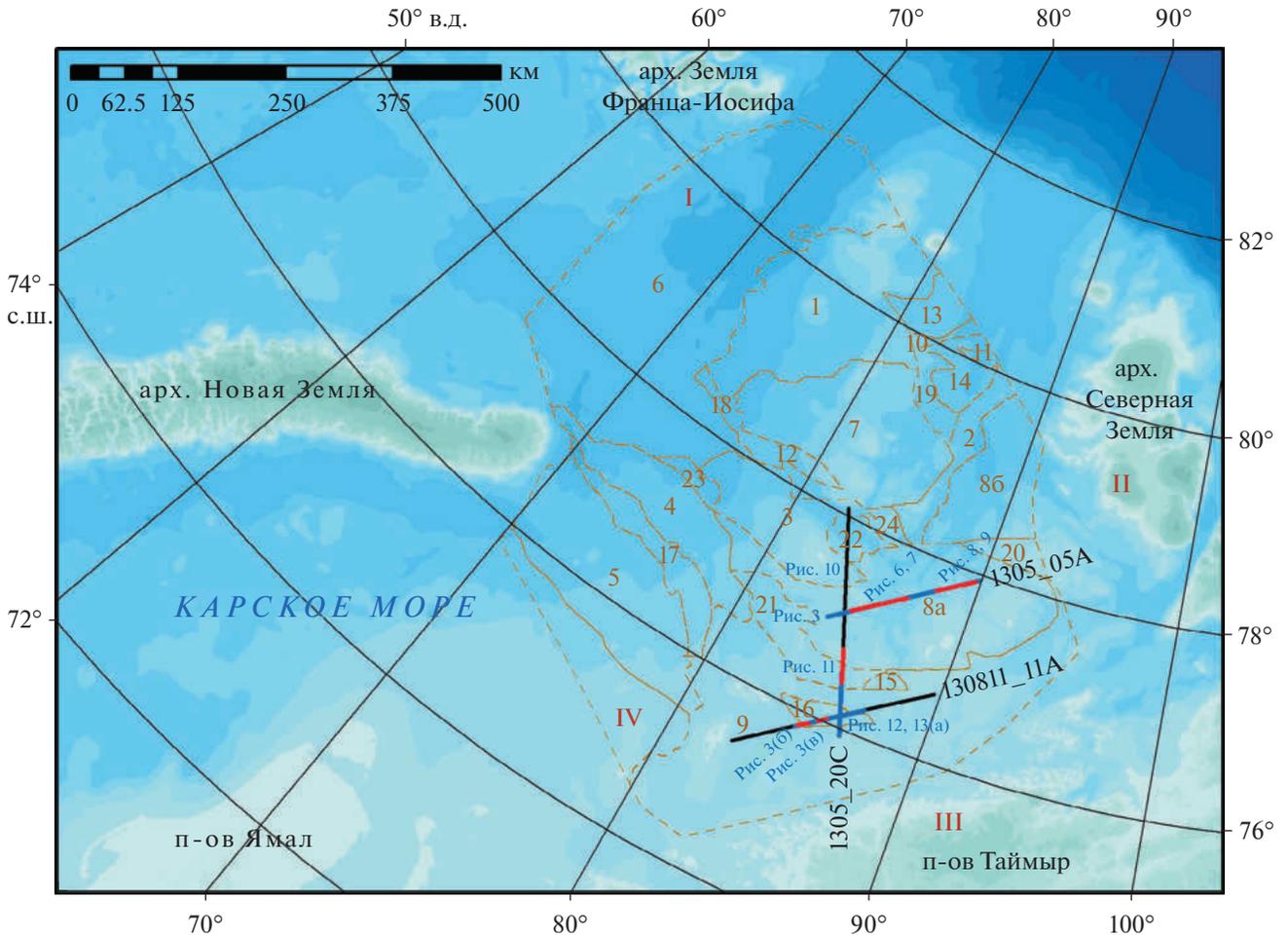


Рис. 2. Положение сейсмических профилей на Притаймырском шельфе Карского моря.

Показаны профили (черным) и отрезки профилей (синим и красным).

Тектонические элементы Северо-Карского региона (по [16]) – *надпорядковые*: I – Карская плита, II – Северо-Баренцевская впадина, III – Пайхой-Новоземельская складчатость, IV – Южно-Карская впадина, V – Таймырско-Североземельская складчатость; *положительные 1-го порядка*: 1 – мегавал Ушакова–Визе, 2 – мегавал Наливкина, 3 – свод Макарова, 4 – Центрально-Карский свод, 5 – Северо-Сибирский мегавал; *отрицательные 1-го порядка*: 6 – прогиб Фобос, 7 – Красноармейский прогиб, 8а – прогиб Уединения, 8б – Присевероземельский прогиб, 9 – Североземельский выступ; *положительные 2-го порядка*: 10 – вал Албанова, 11 – вал Безымянный-2, 12 – поднятие Скалистое; *отрицательные 2-го порядка*: 13 – котловина Седова; 14 – прогиб Урванцева–Воронина, 15 – котловина Безымянная-3, 16 – депрессия Северо-Михайловская, 17 – прогиб Наталья; *полузамкнутые*: 18 – седловина Ермолаева, 19 – ступень Безымянная-1, 20 – Краснофлотский мыс, 21 – ступень Егизарова, 22 – седловина Меннера, 23 – седловина Марковского, 24 – ступень Погребичского.

родов – природных тел, состоящих из пород-коллекторов, частично или со всех сторон ограниченных относительно непроницаемыми породами и являющимися естественными местами для нефти, газа и воды.

Ввиду специфических термобарических и флюидо-динамических условий образования газовых гидратов газогидратный резервуар не только подразумевает наличие непроницаемых покрышек, но и напротив, характеризуется наличием флюидопроводящих зон (в большинстве случаев – субвертикальных). Морфология углеводородного резервуара обычно определяется соотношением

в разрезе и по площади пород-коллекторов с вмещающими их слабопроницаемыми породами, препятствующими рассеиванию углеводородных флюидов и способствующими формированию залежей.

Для газогидратного резервуара, напротив, большое значение, помимо хороших коллекторских свойств и наличия достаточного количества газа в поровом пространстве, имеют наличие достаточного количества реакционноспособной воды и термобарические условия. Роль флюидоупора, применительно к резервуару газовых гидратов, играет зона стабильности газовых гидратов –

та часть литосферы, где гидраты углеводородных газов могут образовываться и находиться в стабильном состоянии длительное время. Таким образом, газогидратный резервуар ограничивается не вещественными (или материальными) границами, в качестве которых в традиционном нефтегазовом резервуаре выступают покрышки, но физическими, температурными и химическими полями и также флюидо-динамическими условиями, обеспечивающими восходящую фильтрацию гидратообразующих газа и воды через зону стабильности.

Отличием является и тот факт, что при наличии плохо проницаемых горизонтов ниже ЗСГГ, образования гидратов в недрах происходит не будет из-за отсутствия количества газа, достаточного для перенасыщения им поровых растворов. Кроме этого, образование газогидратов, хотя и контролируется гранулометрическим составом вмещающих их отложений, что наиболее благоприятно в отложениях с хорошими коллекторскими свойствами, может происходить и в тонкозернистых глинистых отложениях, не являющихся коллекторами.

Составными частями резервуара криогенных газогидратов, помимо ЗСГГ, толщи реликтов подводной мерзлоты, а также флюдопроводников, являются ловушки углеводородов, часть объема которых аккумулировалась в скопления газовых гидратов, в ходе субаэрального промерзания осадочных толщ либо после промерзания. В любом случае, газогидратный резервуар приурочен к верхнему структурному этажу, который традиционно не рассматривается в качестве нефтегазоперспективного.

Актуальность прогнозирования, выявления и изучения криогенных скоплений газовых гидратов на арктическом шельфе и характеристики газогидратного резервуара обусловлена не только значительным ресурсным потенциалом газовых гидратов и их вкладом в глобальные климатические изменения. Их изучение важно также для понимания морфологии газогидратного резервуара, поскольку ранее криогенные скопления на Евразийском шельфе не только не были обнаружены, но и не прогнозировались.

Целью настоящей статьи является прогнозирование газогидратного резервуара, связанного с реликтами подводной мерзлоты на Притаймырском шельфе Карского моря на основе математического моделирования подводной криолитозоны и зоны стабильности газовых гидратов, и его характеристика по данным сейсморазведки МОВ ОГТ.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Притаймырский шельф принадлежит к Северо-Карскому бассейну, рассматриваемому как отдельная тектоническая область древней стабилизации – Северо-Карская плита (рис. 2).

Она сложена преимущественно допалеозойскими и палеозойскими отложениями и тектонически связана со структурами Восточно-Сибирской платформы. На юго-востоке и востоке Северо-Карского шельфа обнажаются смятые в складки структурно-вещественные комплексы Северного Таймыра и Северной Земли, а на юго-западе и северо-западе экспонируются комплексы Новой Земли и Земли Франца-Иосифа [10] (см. рис. 2).

Здесь в качестве перспективных рассматриваются в основном отложения палеозоя, которые доминируют в составе осадочного чехла. Косвенные сведения о составе и нефтегазоносности пород получены по результатам изучения обнажений на близлежащих островах и архипелагах. Учитывая, что эта часть акватории не была до 2022 г. изучена глубоким бурением, модели геологического строения этого бассейна базировались только на геофизических материалах и геологических данных по островам и архипелагам [32].

Северо-Карский бассейн имеет достаточно мощный осадочный чехол (до 15 км [10]), в его составе выделяется пять основных прогибов, разделенных различными поднятиями (см. рис. 2):

- прогиб Присевероземельский;
- прогиб Уединения;
- прогиб Красноармейский;
- прогиб Узкий;
- прогиб Урванцева.

В бассейне выделяются четыре мегасеквенции:

- синрифтовая;
- пострифтовая;
- постинверсионная;
- региональная чехольная.

Рифтогенные впадины северо-восточной части шельфа Карского моря охарактеризованы с помощью геофизических данных. Прогибы Уединения и Длинный разделены сравнительно узкой зоной поднятий фундамента субширотного простирания. Их борта осложнены системами разломов субширотного, северо-восточного и субмеридионального направления, разбивающими фундамент на отдельные блоки, ступенчато погружающиеся к осевым частям.

Глубина залегания фундамента в прогибах 14–16 км. Основной этап погружения сопоставлялся

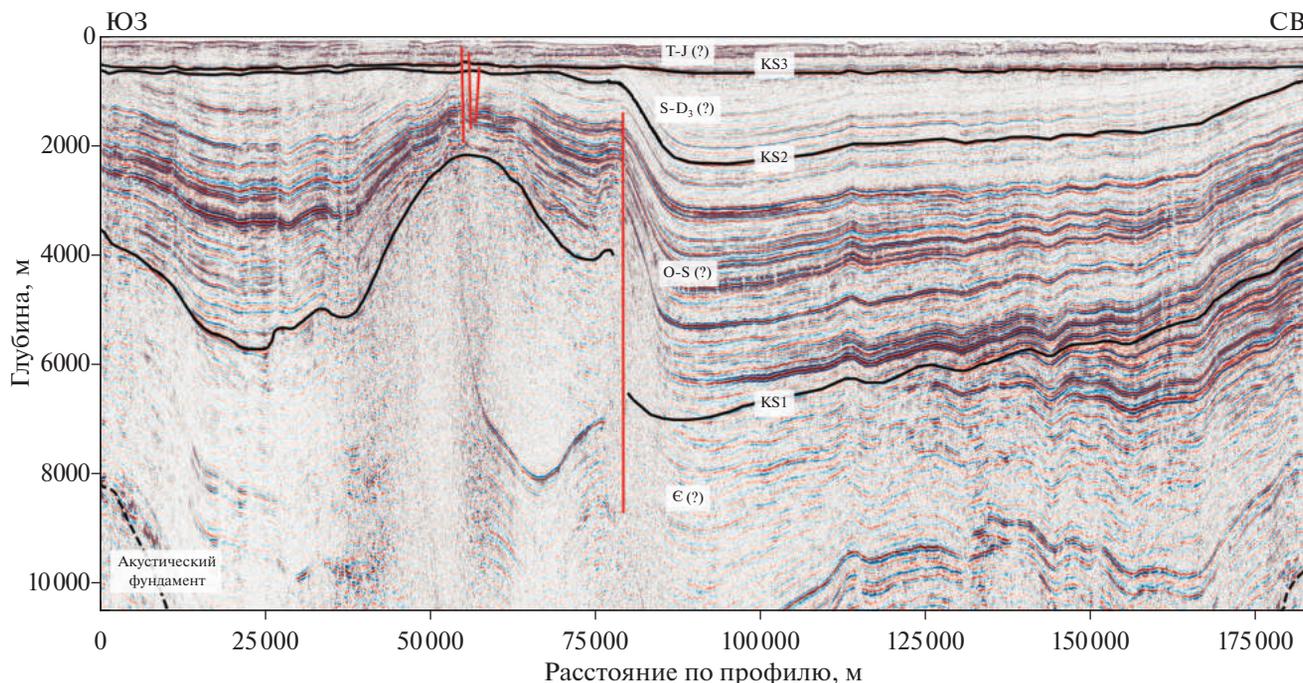


Рис. 3. Разрез по профилю 1305_05А (АО “Севморнефтегеофизика”, г. Мурманск, Россия) с отражающими горизонтами и возрастной привязкой сейсмокомплексов (по данным [12, 31], с изменениями и дополнениями). Показаны разломы (линии красным). Положение профиля – см. рис. 2.

здесь с каледонским тектогенезом на основании данных геологических наблюдений на Северной Земле [7]. Данные о сейсмостратиграфическом анализе по региону позволили предполагать ранне-позднепалеозойский возраст выполняющих прогибы осадочных толщ [4].

Сейсморазведочные данные позволили охарактеризовать Северо-Карский бассейн с сейсмостратиграфических и структурно-тектонических позиций как перспективный в отношении нефтегазоносности. Здесь в отложениях различных осадочных комплексов выделяются антиклинальные, структурно-тектонические, структурно-стратиграфические, структурно-литологические, тектонически-экранированные ловушки. На основании сейсмофациального анализа перспективы нефтегазоносности этого региона связываются с рифогенными постройками и солянокупольными структурами [11].

Наличие диапиров и раннепалеозойской соляно-купольной тектоники, относящейся, вероятно, к позднему ордовику, отмечается также по северному краю Северо-Карского бассейна в прогибе Урванцева [14, 36]. На основе интерпретации сейсмических данных и бассейнового моделирования Северо-Карский бассейн отнесен к преимущественно газонасытым в связи с высокой

зрелостью предполагаемых ордовикско-силурийских нефтегазоматеринских отложений [5].

В отношении нефтегазогеологического районирования северная часть Карского моря представляет собой самостоятельную Северо-Карскую перспективную нефтегазоносную область (СПНГО), нефтегазоносность которой охарактеризована с использованием эталонных участков Тимано-Печорской провинции и на основе изучения островов архипелага Северная Земля с установленными там прямыми признаками силурийско-девонских отложений [1].

На большей части Северо-Карского бассейна на временных разрезах четко фиксируется эрозионная поверхность, разделяющая палеозойские и маломощные мезозойские отложения, с которой в этом регионе связан крупный перерыв в осадконакоплении.

Исследование нефтегазоносных систем проводилось на основе профиля 130505 ОАО “Севморнефтегеофизика” (г. Мурманск, Россия) [3].

В волновом поле сейсмических разрезов северной части Карского моря ранее был выделен ряд отражающих горизонтов, четыре из которых были прослежены в осадочном чехле Северо-Карского бассейна [1, 2] (рис. 3, горизонты F, KS-1–KS-3).

Отражающий горизонт F соответствует поверхности акустического фундамента архей–протерозой-

ского возраста; горизонты KS-1, KS-2 и KS-3 расчленяют палеозой–мезозойский осадочный чехол на ряд сейсмических комплексов.

Отражающий горизонт KS-1 – геологическая граница, прослеженная на глубинах от 11.5 км на западе до 300 м на севере и юге и выклинивающаяся к восточной и юго-восточной части акватории. Данный горизонт, возможно, маркирует кровлю силурийско–ордовикских толщ, сформированных в ходе трансгрессии моря, отделяя терригенно-карбонатно-сульфатные комплексы мелководных и прибрежно-морских отложений от вышележащих толщ [1, 2].

Отражающий горизонт KS-2 выделяется на глубинах от 8.5 км на западе и 200 м на востоке и выклинивается к юго-востоку и северо-востоку акватории. Этот горизонт интерпретируется как внутривермское несогласие, образованное в результате регрессии моря, глобальной смены климата в нижнепермское время и установления терригенного типа седиментации. KS2 также интерпретируют как границу между нижележащими карбонатно-сульфатными коллекторскими толщами и вышележащими терригенными породами [1, 2].

Отражающий горизонт KS3 соотносится предположительно с кровлей триасовой толщи и представляет собой эрозионный срез нижележащих терригенных отложений, который выделяется на поддонных глубинах 2500–120 м [1, 2].

В работе [15] приведены результаты первых буровых работ, сопровождавшихся сейсморазведкой в северной части Карского моря, подтверждающие палеозой–мезозойскую модель осадочного чехла Северо-Карского бассейна.

Синрифтовые отложения отнесены к кембрийской системе и представлены терригенными и карбонатно-терригенными коллекторами с прослоями глин. Вероятно, в интересующем нас интервале разреза это – осадочная толща, ограниченная акустическим фундаментом и отражающим горизонтом KS-1, ранее датированная силуром и ордовиком.

Отложения нижней части среднего структурного этажа представлены карбонатными толщами ордовика и нижнего силура, и в верхней части – терригенными коллекторами с прослоями глин. Отложения среднего структурного этажа ограничены отражающими горизонтами KS-1 и KS-3 и ранее были датированы девоном–триасом.

Верхний структурный этаж представлен терригенным комплексом отложений триасово–юрского возраста, который ранее был отнесен к юрской и меловой системам.

Таким образом, новые данные, полученные на основе бурения, показывают более древний возраст осадочного чехла, при этом положение элементов нефтегазоносных систем (коллекторов разного состава и флюидоупоров) относительно горизонтов KS-1, KS-2 и KS-3, вероятно, совпадает с нефтегазоносными комплексами из [1], используемыми в нашей работе.

Далее мы используем сеймостратиграфию по [1, 2], указывая возрастные датировки со сдвигом в сторону более древнего возраста, с учетом новых данных по стратиграфическому бурению.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Численное моделирование подводной мерзлоты и зоны стабильности криогенных газовых гидратов

После перехода мерзлой толщи, сформированной в субэкральных условиях, в субаквальное положение начинается ее прогрев под воздействием глубинного потока тепла, а затем и деградация снизу. При достижении в результате деградации снизу мощности, отвечающей стационарным условиям, дальнейшее развитие реликтовой субмаринной мерзлоты во многом определяется характером гидродинамической обстановки у дна.

Таким образом, имея палеогеографический сценарий, эвстатическую кривую колебаний уровня моря, данные о глубинном тепловом потоке, океанологические данные о температурах и солености придонных вод и климатических изменений, можно на основе математического моделирования предсказать состояние реликтовой субмаринной мерзлой зоны и связанной с ней зоны стабильности газовых гидратов (ЗСГГ). Методика моделирования и картирования реликтов подводной мерзлоты и ассоциированной ЗСГГ для моря Лаптевых подробно описаны в [59].

По сравнению с работой [59], в этом исследовании методика претерпела ряд изменений. Расчет зоны стабильности газовых гидратов проводился для критического сценария, т.е. при нулевом содержании газогидратов в порах. Изменения также претерпело верхнее граничное условие, которое получило представление, схожее с работами [28, 52], как синтез палеореконструкций относительной температуры воздуха (T_r) и эвстатических колебаний уровня моря из модели [45] за 440 тыс. лет (наиболее репрезентативная часть кривой [58]) с осредненными за 30 лет (с 1992 по 2023 гг.) данными по температуре (T_{bot} , °C) и солености

придонной воды (S_{bot} , ‰) [54], а также приземной температуры воздуха (ΔT_a , °C) [49].

Для периодов регрессии моря (согласно эвстатической кривой), когда суша была открыта для выхолаживания, температура на верхней границе принималась равной приземной температуре воздуха, т.е. $T'_{(z=0)} = T'_a$, где $T'_a = T'_r + \Delta T'_a$. Для периода трансгрессии моря температура на верхней границе определялась температурой придонной воды, т.е. $T'_{(z=0)} = T'_{bot}$.

Температура замерзания поровой воды (T_f , °C) представлялась как функция от придонной солёности морской воды (S_{bot}). Солёность учитывалась только в зональной изменчивости и принималась постоянной по разрезу, поскольку нас интересовали только первые сотни–тысяча метров, в пределах которых изменение солёности поровой воды незначительно [51]. Температура замерзания была представлена как функция не только солёности, но и давления (глубины моря) [57]:

$$T_f = -0.73P - 0.064S, \quad (1)$$

где S – концентрация соли в морской воде (г/кг). При этом давление принималось гидростатическим:

$$P = \rho gh, \quad (2)$$

где h – глубина относительно уровня моря, ρ – плотность морской воды, g – ускорение свободного падения.

В модели учитывались приращения за счет гидростатического давления для субаквальных условий и атмосферного давления для субаэральных условий [65].

Сопоставление геотермических измерений из архива [46] с картой [33] позволили нам определить с учетом [34] среднюю величину теплового потока для Притаймырского шельфа Карского моря, равную 57.2 мВт/м². Уплотнение отложений с глубиной учитывалось по закону Ати [37]. Теплофизические свойства отложений даны по [59]. Расчет проводился средствами открытого языка программирования “Julia” [68] по неявной разностной схеме для домена 10 тыс. м с шагом 1 м по расчетной сети и с шагом по времени 10⁹ с. Картирование выполнялось для регулярной сети с разрешением 0.08° × 0.08°.

Интерпретация данных сейсморазведки в пределах прогнозируемых мерзлых толщ и зоны стабильности газовых гидратов

Свободный газ может либо скапливаться в зоне стабильности газовых гидратов, либо мигрировать

вверх по этой зоне, что на сейсмических записях проявляется в виде аномалий [43, 48, 56, 64]. Эти аномалии, к которым относят яркие пятна, маркирующие ловушки углеводородов, газовые трубы (часто – с покмарками на морском дне), хаотичные отражения, зоны низкоамплитудных отражений в случае, если они расположены в ЗСГГ или под ней, отражают флюидодинамику газогидратного резервуара и косвенно указывают на скопления газа или газовых гидратов.

На суммированных разрезах МОВ ОГТ аномалии типа “яркое пятно” проявляются как усиление или ослабление амплитуд отраженного сигнала в сочетании с инверсией фазы отраженного сигнала. Маркером высокой газонасыщенности отложений являются скоростные аномалии, которые на сейсмических разрезах представлены ложными синклинальными структурами, противоречащими геологическому строению района.

Для выявления индикаторов гидратообразования в пределах региона исследований были изучены цифровые сейсморазведочные данные МОВ ОГТ, полученные в 2009 г. ОАО “Севморнефтегеофизика” (Мурманск, Россия). Интересующая нас совокупность признаков реликтов подводной мерзлоты, концентрированной миграции флюидов, аномальной газонасыщенности и ловушек различного типа в ЗСГГ обнаружилась на 3-х глубинных сейсморазведочных профилях (см. рис. 2, профили 1305_05А, 1305_20С 130811_11А). Для анализа сейсмических разрезов использовалось интерпретационное программное обеспечение “Kingdom” (Houston, USA) [66].

Обычно выявление мерзлоты методом МОВ ОГТ основано на скоростном анализе, сейсмической инверсии и анализе волновой картины на сейсмическом разрезе. В связи с отсутствием данных о скоростных характеристиках верхней части разреза, для изученных материалов был возможен только анализ волновой картины. На сейсмических разрезах мерзлота определяется по высокоамплитудным отражениям, многократным переотражениям между дном и кровлей мерзлых толщ, а также по скоростным аномалиям (эффект пулл-ап) [48, 50].

Таким образом, целевыми объектами в нашем исследовании являлись последовательности субпараллельных высокоамплитудных отражений, маскирующих реальное геологическое строение верхней части осадочного разреза. Отражения от верхней границы (кровли) подводной мерзлой толщи хорошо определяется сейсмоакустическими

методами [48, 61], но разрешающей способности метода МОВ ОГТ может быть недостаточно для ее определения. В условиях сейсморазведочных работ на суше положение подошвы мерзлых отложений определяется хорошо, но для материалов морских работ характерно, что из-за многократных отражений нижняя граница практически не прослеживается [48].

Для более детального изучения выявленных аномалий в пределах газогидратного резервуара выполнен атрибутивный анализ в программном обеспечении “Kingdom” (Houston, USA) [66].

Атрибут *similarity* показывает схожесть сейсмоторасс между собой, маркирует вертикальные зоны, резко отличающиеся по волновой картине.

Поскольку газонасыщенные породы способны менять частотный состав сигнала, был выбран атрибут *wavelet dominant wavenumber* (разрез доминирующих частот, в основе которого лежит вейвлет преобразование).

Для выявления ловушек углеводородов проводился структурный анализ сейсмических разрезов. Целевыми объектами для анализа являлись антиклинальные структуры, угловые несогласия и диапировые структуры. Нами были выбраны те объекты, в контурах которых наблюдаются локальные амплитудные аномалии, вероятно, свидетельствующие о содержании газа и газогидратов; и объекты, над которыми в верхней части разреза наблюдались сейсмические признаки подводной мерзлоты.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Подводная мерзлота и зона стабильности газовых гидратов на шельфе Карского моря

В результате численного моделирования построены прогнозные карты распространения зон стабильности газовых гидратов и реликтов подводной мерзлоты в Карском море.

Согласно полученным результатам, в Карском море реликты подводной мерзлоты сохранились в Байдарацкой бухте и на шельфе вплоть до изобаты 80 м, включая район Русановского месторождения (рис. 4, уч. 2, уч. 5).

В глубоководной части Карского моря реликты мерзлых пород могут быть представлены в виде отдельных островов. При этом толщина РПМ в северо-восточном секторе Карского моря в несколько раз превосходит ее величину в юго-западном секторе акватории. Наиболее широкое распространение РПМ на северо-западе акватории прогнозируется на Притаймырском шельфе и побережье с резким градиентом в сторону проливов Северной Земли,

где реликты подводной мерзлоты отсутствуют (см. рис. 4).

Данные моделирования по границе распространения реликтовой подводной мерзлоты хорошо согласуются с аналогичными данными по [47, 60], а также с данными сейсмоакустических исследований [21], характеризующихся высокой степенью неопределенности.

В связи с большим числом неучтенных в моделях подводной мерзлоты факторов, основным из которых является недостаточная геотермическая изученность арктических акваторий, результаты любых модельных расчетов, включая представленный в данной работе, следует рассматривать не как фактическое распространение реликтовой подводной мерзлоты, но как прогноз ее распространения.

Как и в любой модели, прогнозируемая нами широкая зона распространения реликтовой подводной мерзлоты не означает фактического сплошного залегания льдосодержащих пород, так как модель не учитывает многообразие региональных особенностей, включая геологическую обстановку региона [59] (см. рис. 4).

Исходя из того, что Обская губа в периоды регрессии представляла собой палео-дельту, расчет для данного участка домена не проводился.

Результаты бурения скважин АО “АМИГЭ” (г. Мурманск, Россия) в Обской губе также свидетельствуют об отсутствии подводной мерзлоты в ее центральной части [25] (см. рис. 4, уч. 1).

В Байдарацкой губе кровля подводной мерзлоты прогнозируется на поддонных глубинах >100 м в ее центральной части, хотя по результатам бурения скважины глубиной 100 м мерзлота так и не была вскрыта [26] (см. рис. 4, уч. 2).

На приуральском берегу Байдарацкой губы падение кровли мерзлоты в сторону центральной части губы крутое. Об этом свидетельствует тот факт, что скважины, пробуренные в 1988 и 1994 гг. в 200 м от береговой черты, мерзлых пород не вскрыли [12].

В инженерно-геологическом и геокриологическом отношении исследовательский интерес представляют реликты многолетнемерзлых сильно льдистых пород протяженностью массива >10 км, выявленные в Приямальской акваториальной части [9, 13].

На Крузенштернском участке опорные скважины глубиной 40 м РПМ не вскрыли, однако они прогнозируются по временным разрезам профило-

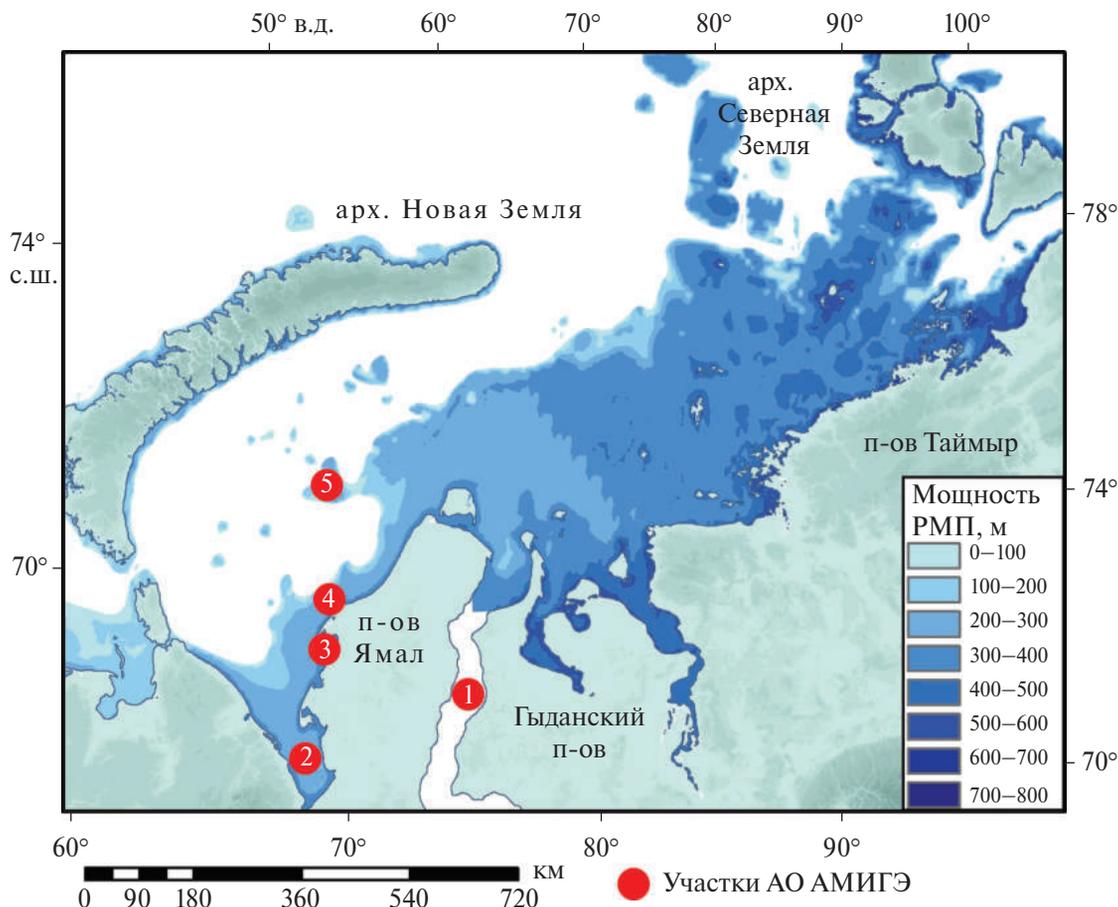


Рис. 4. Карта прогнозного распространения подводной реликтовой мерзлоты на шельфе Карского моря.

Численное моделирование проведено с использованием “Julia” Programming Language [68].

Показаны (цифры в красных кружочках) участки инженерно-геологических изысканий (АО “АМИГЭ”, г. Мурманск, Россия): 1 – Обская губа; 2 – Байдарацкая губа; 3 – Крузенштернская губа; 4 – участок Харасавэй; 5 – Русановское месторождение.

графа “Спаркер” с генератором импульсов CSP-D (“Applied Acoustic”, Great Britain) на поддонной глубине ~100 м [24], что соответствует нашим модельным данным (см. рис. 4, уч. 3).

Участок Харасавэй характеризуется двумя типами мерзлоты: реликтовой и новообразованной (см. рис. 4, уч. 4).

Полагаем, что на участке Харасавэй неглубоким бурением была вскрыта новообразованная мерзлота возле мыса Бурунный при проведении инженерно-геологических изысканий [8, 20].

По нашим прогнозам, участок Харасавэй характеризуется сравнительно скромными мощностями подводной мерзлоты (до 300 м). По результатам буровых работ новообразованная мерзлота присутствует на глубине до 40 м [20]. Кровля подводной мерзлоты вскрыта не была, за исключением продолжения материковой мерзлоты в прибрежной зоне.

Выбросы газа фиксировались в районе Русановского месторождения, где нами прогнозирует-

ся сохранение благоприятных условий для существования реликтов подводной мерзлоты и зоны стабильности газовых гидратов (см. рис. 4, уч. 5).

Однако в работе [23] мерзлота на этом участке характеризуется как новообразованная. Вероятно, в данном районе имеются специфические геокриологические условия, способствующие формированию мерзлотных новообразований, либо мерзлота имеет двуслойное строение, сочетая РПМ и новообразованную мерзлоту.

На основании геолого-геофизических и модельных данных можно констатировать, что подводная мерзлота на юго-западном шельфе Карского моря носит спорадический – островной или редкоостровной характер [8, 9, 12, 13, 20, 26, 47]. Наибольшая мощность реликтовой мерзлоты >200 м возможна в районах шельфа с глубинами моря <30 м, характеризующихся низким тепловым потоком и значениями температурного скачка между эпохами не менее 10°C (особенно при

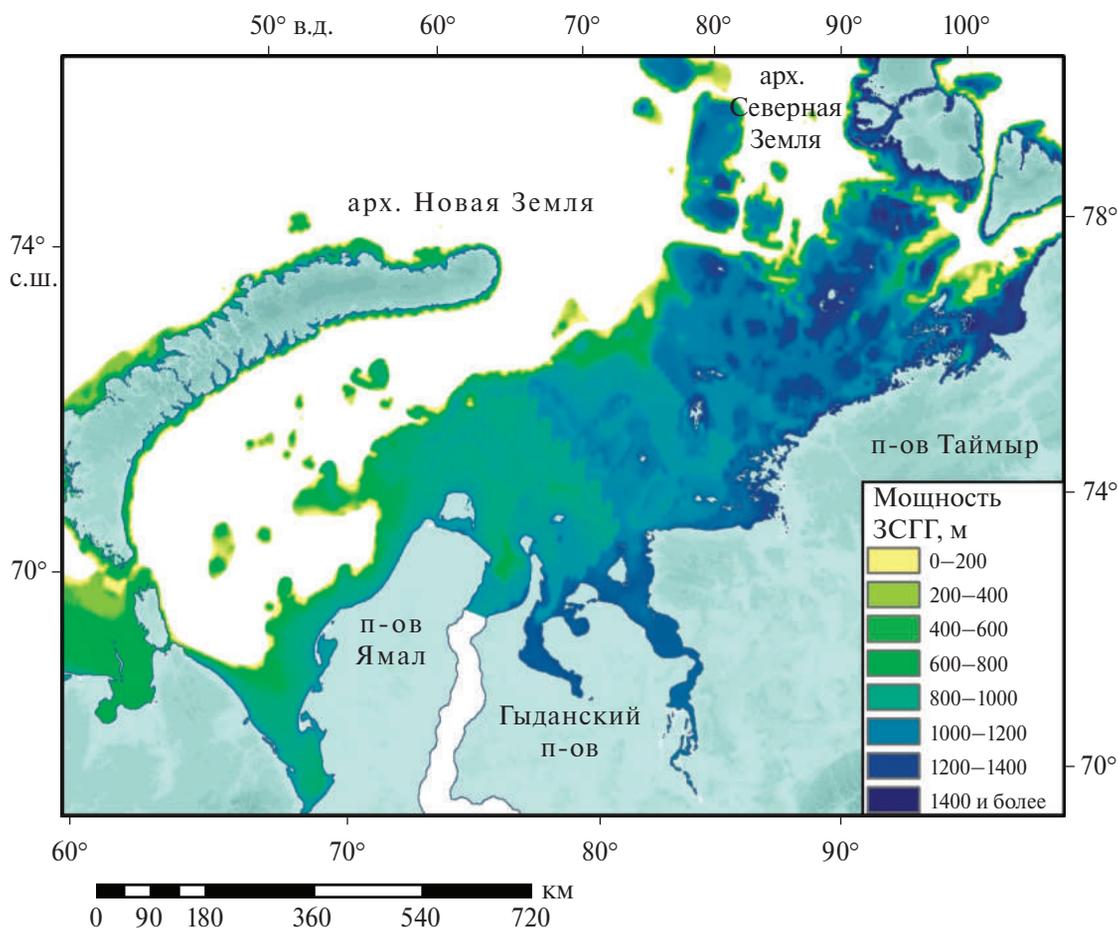


Рис. 5. Карта прогнозного распространения термобарической зоны стабильности связанных с мерзлотой газовых гидратов на шельфе Карского моря.

Численное моделирование проведено с использованием “Julia” Programming Language [68].

глубине моря на стабильных и погружающихся участках <10 м – время таяния не более 6 тыс. лет).

Предполагается наличие подводной мерзлоты в виде отдельных островов мощностью до 100–150 м в юго-восточной части Карского моря и на относительно мелководных участках в районе Русановского месторождения (см. рис. 4, уч. 5). По модельным данным с учетом современной среднегодовой $T_{\text{бот}}$ реликты подводной мерзлоты у дна не прогнозируются, поддонные глубины залегания реликтовой мерзлоты для западной части Карского моря начинаются от 80 м.

Предполагается, что реликтовая подводная мерзлота северо-восточного шельфа Карского моря характеризуется сплошным распространением [39]. По нашим расчетам мощность РПМ в данном регионе в несколько раз превышает мощность РПМ в юго-западной части акватории, что наряду с ее географическим расположением и

минимальным вкладом пресных вод сибирских рек (и палеорек), может косвенно подтверждать сплошной характер распространения РПМ. По модельным расчетам кровля РПМ к северо-востоку от Гыданского п-ова расположена на поддонных глубинах 20–40 м, понижаясь до 40–60 м у Северной Земли (см. рис. 4).

Моделирование реликтовой подводной мерзлоты явилось основой для прогноза условий стабильности связанных с ней газогидратов. Карта, распространения ЗСГГ на шельфе Карского моря, выполнена на основе модельных расчетов и GIS-картирования [67] (рис. 5).

При сравнении результатов расчета модельная зона стабильности криогенных газовых гидратов практически точно повторяет распространение реликтовой подводной мерзлоты до изобаты в 80 м (см. рис. 5).

При этом наибольшие мощности ЗСГГ приурочены к северо-восточному шельфу со сложным

рельефом, вследствие чего возникают высокие градиенты по мощности и положению границ реликтовой подводной мерзлоты, как и ЗСГГ.

На Притаймырском шельфе максимальные мощности ЗСГГ прогнозируются на локальных возвышенностях морского дна и достигают 1400 м, но в понижениях рельефа зона стабильности газовых гидратов может отсутствовать. Полученные результаты согласуются с работой [31], показывающей, что фактическое распространение зоны стабильности криогенных газовых гидратов контролируется реликтами подводной мерзлоты и имеет островной характер, ограниченный прибрежной зоной и окружением морских островов.

Характеристика газогидратного резервуара на Притаймырском шельфе

Прогиб Уединения. Газогидратный резервуар в прогибе Уединения охарактеризован по профилю 130505А (см. рис. 2).

Комплекс верхнего структурного этажа, расположенный в ЗСГГ, представлен триасово-юрскими отложениями. Комплекс среднего структурного этажа, частично находящийся в зоне стабильности газовых гидратов, сложен породами ордовикско-девонской систем [15] (см. рис. 3).

Предполагается, что отложения верхнего структурного этажа представлены терригенным комплексом как континентального, так и прибрежно-морского генезиса. Грубозернистый состав прогнозируется для отложений русловых фаций, мелкозернистый для озерных; для прибрежно-морских отложений вероятен разнообразный состав отложений. Формирование глин предполагается в зонах многочисленных стратиграфических несогласий [1]. Отложения среднего структурного этажа, образованные в условиях мелководного осадконакопления, представлены карбонатно-терригенным комплексом пород [15].

Антиклиналь в юго-западной части профиля 130505А, вероятно, является частью крупной диапировой структуры, связанной с соляно-купольной тектоникой раннего палеозоя [18] (см. рис. 2, положение профиля; рис. 6).

Отложения на рассматриваемом фрагменте профиля сильно деформированы, но разрывных нарушений с очевидным смещением слоев выявлено мало. На разрезе присутствует аномалия типа “яркое пятно” в сводовой части антиклинали, перекрытой толщей мезозойских отложений с ненарушенным залеганием. С этим перерывом,

вероятно, связано формирование толщи глин – регионального флюидоупора [1]. Ниже и выше горизонта KS-3 предполагаются коллекторские толщи терригенного состава (см. рис. 6).

Мощность осадочного выполнения газогидратного резервуара на данном участке составляет ~1 км. Зона стабильности газовых гидратов мерзлотного генезиса непридонного типа характеризуется мощностью ~700 м. Подошва реликтовой подводной мерзлоты, с одной стороны, может рассматриваться как флюидоупор, но, с другой стороны, скопления газогидратов могут располагаться в льдосодержащих породах.

Признаки сосредоточенной миграции газа в сторону морского дна, минуя ЗСГГ и мерзлые породы, представлены на данном фрагменте аномалиями “типа газовые трубы” (см. рис. 6, а).

На этот участок профиля 130505А была составлена стратиграфическая схема, характеризующая элементы газогидратного резервуара, связанные с антиклинальной структурой (см. рис. 6, б).

Дифференцированы коллекторы в пределах зон скопления газовых гидратов под реликтами подводной мерзлоты и в мерзлых породах (характер коллекторов смешанный – карбонатно-терригенный). Положение подошвы модельных мерзлых отложений, которые могут являться флюидоупором, практически совпадает с трудно проницаемыми отложениями (см. рис. 6, горизонт KS-3).

В сводовой части антиклинали располагается зона локальных разломов, а на крыльях антиклинали отмечаются ослабленные зоны. Указанные флюидопроводники могут обеспечивать миграцию в ЗСГГ газа, который может стабилизироваться в верхней части разреза в форме газогидратов. Гидратообразование наиболее вероятно в сводовой части антиклинали ниже стратиграфического горизонта KS-3 – флюидоупора.

Над ЗСГГ располагается узкая зона прогнозируемых реликтов подводной мерзлоты, представленная терригенным коллектором. Здесь возможно сохранение реликтов газогидратных скоплений за счет низких температур и эффекта аккумуляции гидратов газа в мерзлых толщах [40].

На разрезе атрибута *similarity* видны узкие вертикальные зоны, в которых оси синфазности фактически не коррелируются; эти же зоны подсвечены более низкими частотами на разрезе доминирующих частот (рис. 7).

На обычном разрезе эти зоны отмечены вертикальными полосами, в которых уменьшается уровень амплитуд сигнала (см. рис. 6, а).

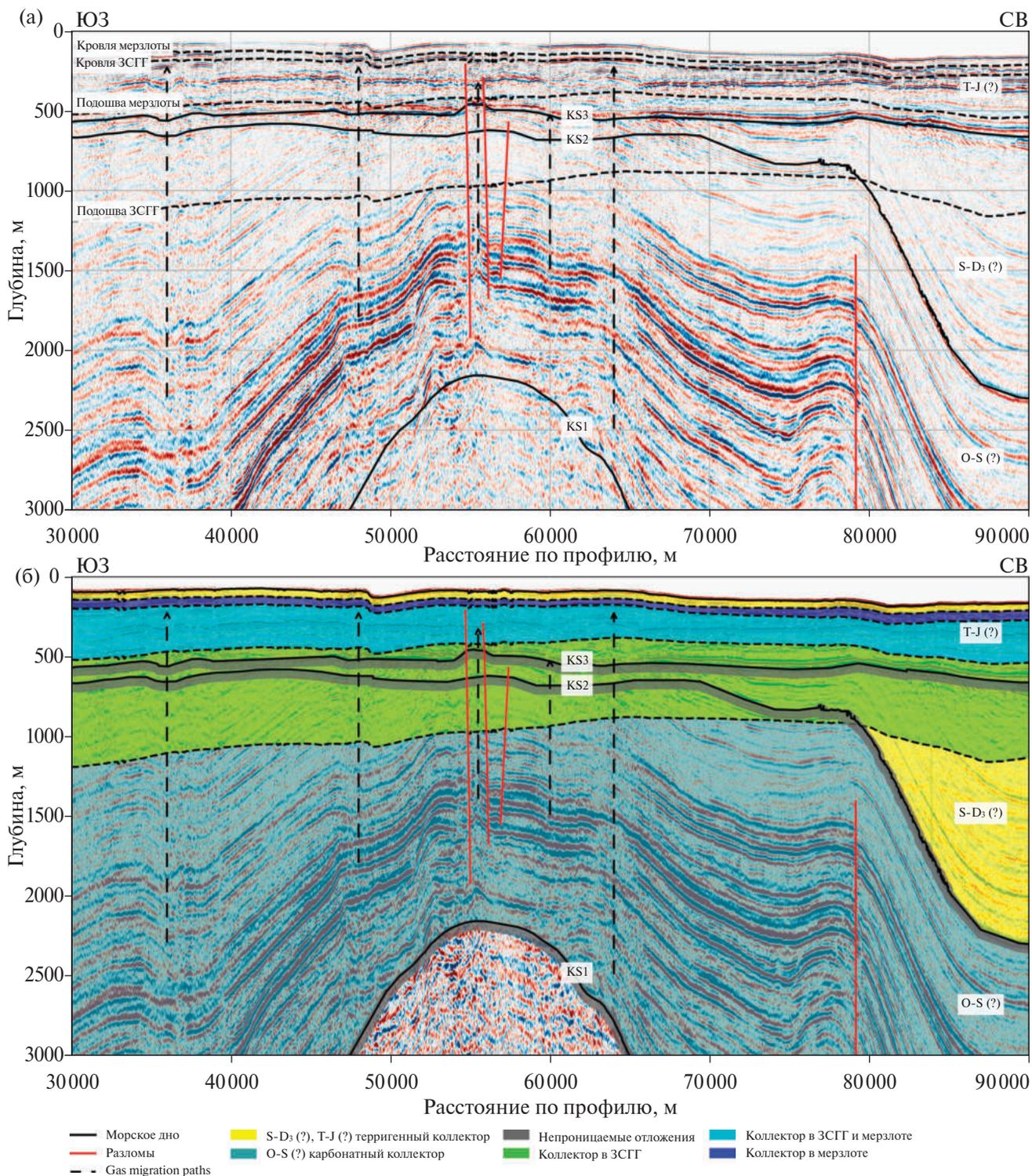


Рис. 6. Антиклинальная структура (фрагмент профиля 130505А) и ее соотношение с элементами газогидратного резервуара (сейсмогоризонты (по [32]), возраст отложений (по [12]), сеть разломов – интерпретация авторов).

(а) – фрагмент профиля 130505А (положение профиля – см. рис. 2);

(б) – стратиграфическая схема (характеризует элементы газогидратного резервуара, связанные с антиклиналью).

Поскольку выявленные аномалии типа “газовая труба” пересекают и кровлю, и расчетную подошву подводной мерзлоты, можно полагать,

что толща является проницаемой и, вероятно, характеризуется распространением островной многолетней мерзлоты.

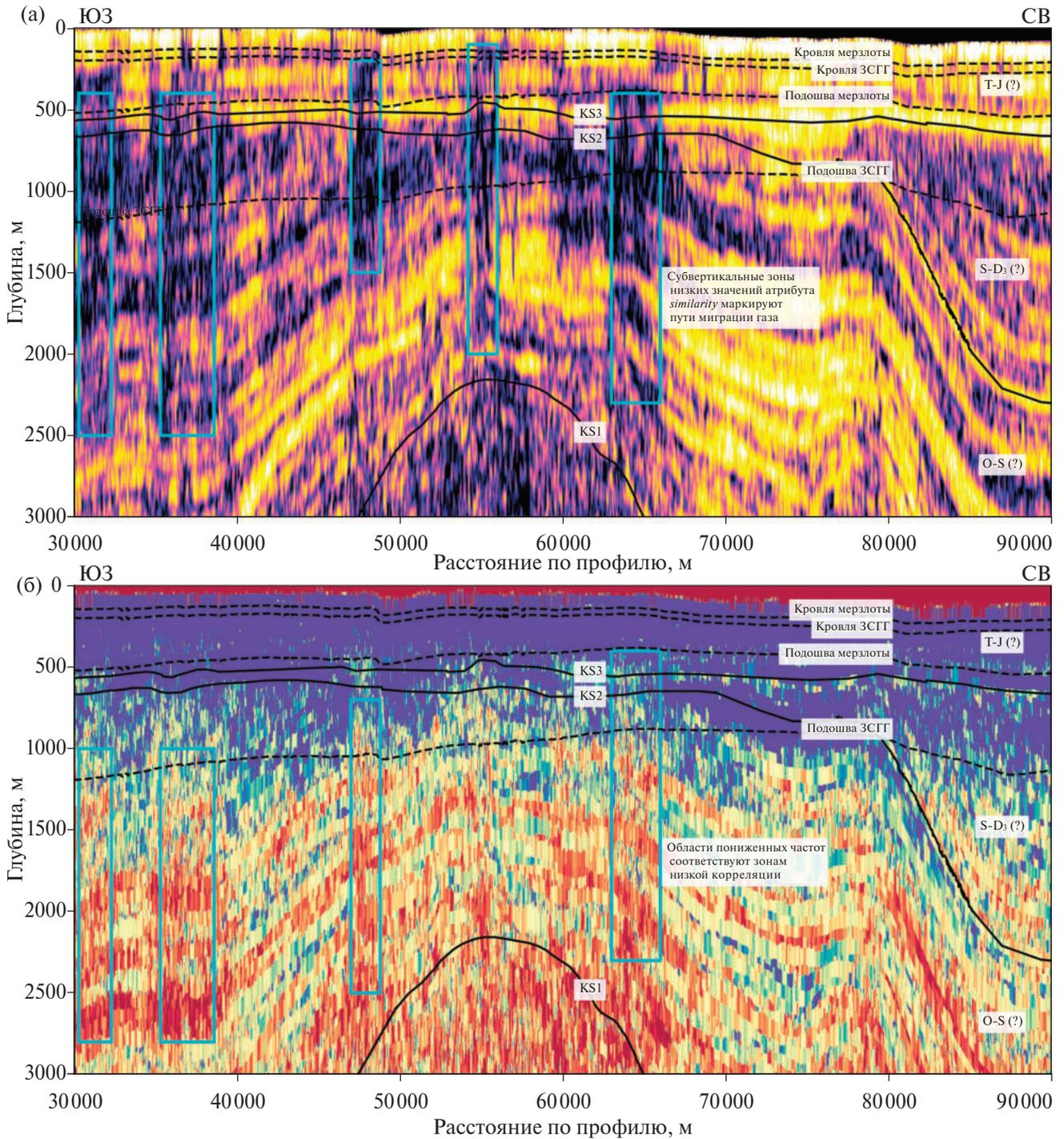


Рис. 7. Разрезы атрибутов *similarity* (а) и *wavelet dominant wavenumber* (б) для фрагмента профиля 130505А (сейсмогоризонты – по [32], возраст отложений – по [12]).

На разрезах атрибутов показано: положение зон низкой корреляции отражений и зон пониженных частот (рамки бирюзовым); границы зон стабильности газовых гидратов и реликтов подводной мерзлоты (пунктир). Положение фрагмента профиля – см. рис. 2.

На восточном участке профиля 130505А на удалении от предполагаемой диапировой структуры выявлены хорошо выраженные очаги разгрузки газа – аномалии типа “газовая труба”, над которыми локализуются покмарки (см. рис. 2, рис. 8, а).

Мощность прогнозируемого резервуара составляет ~1200 м, осадочное выполнение представлено породами силура–девона под реликтами подводной мерзлоты, а в пределах мерзлых толщ – нерасчлененными отложениями триасово–юрской

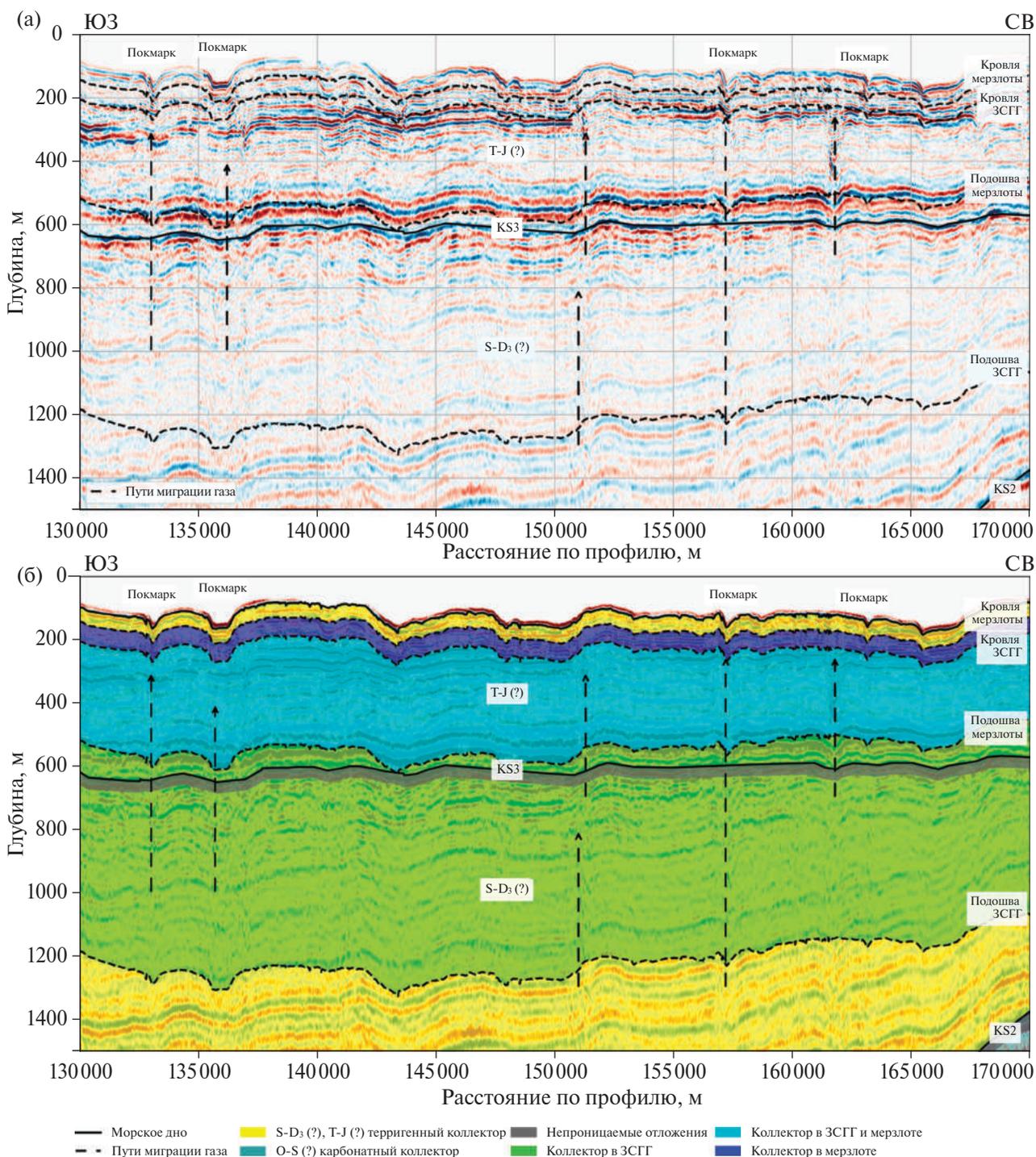


Рис. 8. Соотношение геологических структур на сейсмическом разрезе с признаками разгрузки газа (фрагмент профиля 130505А) (а) и элементов газогидратного резервуара (б), (сейсмогоризонты – по [32], возраст сеймо-комплексов – по [12]).

Показаны (стрелки черным) очаги разгрузки газа в пределах газогидратного резервуара. Положение фрагмента профиля – см. рис. 2.

и четвертичной систем. Наличие хорошо выраженных крупных покмарков на дне Карского моря с подводящими каналами миграции газа характеризует активную дегазацию недр на данном участке.

Таким образом, наблюдается сквозная миграция газа через ЗСГГ, что свидетельствует об островном характере подводной мерзлоты или о ее отсутствии. Для данного участка профиля 130505А также была составлена стратиграфическая схема

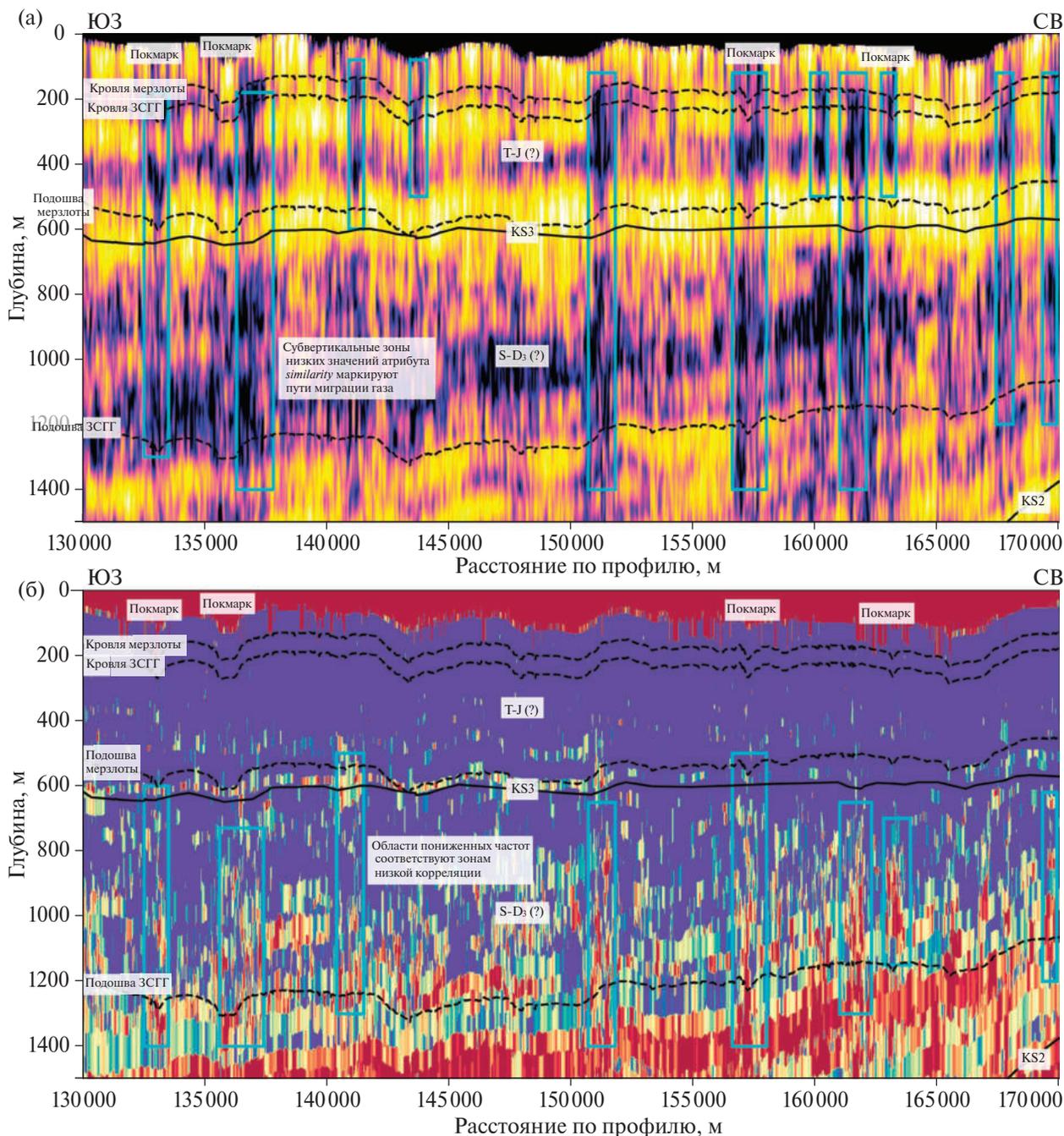


Рис. 9. Разрезы атрибутов *similarity* (а) и *wavelet dominant wavenumber* (б) для фрагмента профиля 130505 (сейсмогоризонты (по [32]), возраст сейсмокомплексов, (по [12])).

Показано: положение зон низкой корреляции отражений и зон пониженных частот (рамки бирюзовым); границы зон стабильности газовых гидратов и реликтов подводной мерзлоты (пунктир).

Положение фрагмента профиля – см. рис. 2.

с нанесенными элементами нефтегазоносных систем (см. рис. 8, б).

На схему нанесены признаки разгрузки газа (пути миграции газа и покмарки). Зеленым отмечен коллектор, попадающий в ЗСГГ. Однако наличие очагов разгрузки может свидетельствовать об островном характере ЗСГГ или об

отсутствии термобарических условий гидратообразования.

Для дополнительного уточнения выявленных путей миграции газа для данного фрагмента профиля были рассчитаны сейсмические атрибуты – *similarity* и *wavelet dominant wavenumber*, как и для предыдущего фрагмента профиля (рис. 9).

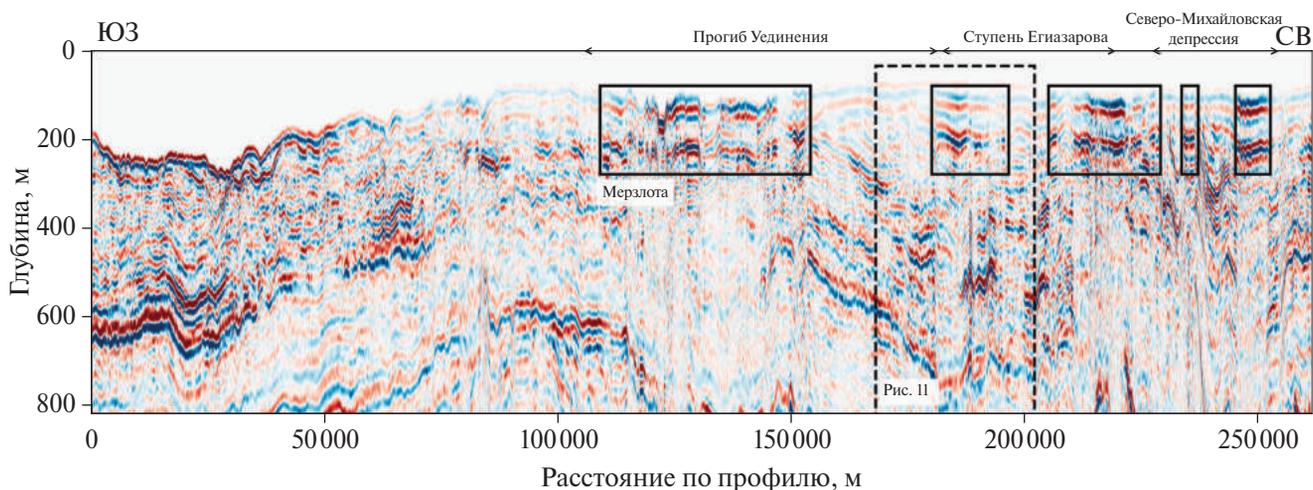


Рис. 10. Сейсмический разрез по профилю 1305_20С.

Обозначено: интерпретация реликтов подводной мерзлоты (рамки сплошной линией); потенциальные газогидратносные объекты (рамка пунктиром).

Положение профиля — см. рис. 2.

На разрезе атрибута *similarity* наблюдаются узкие вертикальные зоны, в которых когерентность осей синфазности минимальна. Зоны с низкой корреляцией отражений отмечены изменением частотного состава в сторону низких частот на разрезе доминантных частот, но динамическая разрешенность на разрезе доминирующих частот недостаточна и неоднозначна.

Ступень Егиазарова. Ступень Егиазарова при-мыкает к прогибу Уединения (см. рис. 2). Стратиграфия и элементы углеводородных систем для данного участка были также заимствованы из [1] с изменениями, согласно [15].

Характеристика газогидратного резервуара близка к его характеристике в прогибе Уединения [1, 15]. На ступени Егиазарова и в прогибе Уединения выделены одни и те же стратиграфические комплексы, включая региональные флюидоупоры, приуроченные к поверхностям несогласия. Отложения верхнего структурного этажа представлены терригенными коллекторами среднего структурного этажа и коллекторами карбонатно-терригенного состава. Распространение подводной мерзлоты изучено на примере профиля 1305_20С, пересекающего и ступень Егиазарова, и прогиб Уединения (см. рис. 2).

На сейсмическом разрезе видно, что подводная мерзлота на изучаемой акватории имеет островной характер и характеризуется высокими амплитудами (рис. 10).

Динамическая характеристика в пределах выделенных островов подводной мерзлоты непостоянна и коррелирует с льдистостью пород. Кроме

того, острова подводной мерзлоты разделяют прозрачные зоны, скорее всего, являющиеся таликами. Важно отметить, что нижняя граница высокоамплитудных отражений, интерпретируемых как мерзлые отложения, находится на 200–250 м выше уровня прогнозируемой мерзлоты и не характеризует реальный разрез реликтов подводной мерзлоты, скорее всего, из-за слабой чувствительности метода МОВ ОГТ.

Поскольку мерзлые отложения обладают высоким коэффициентом отражения, энергия сейсмической волны расходуется на многократные отражения между подводной мерзлотой и свободной поверхностью, а волновое поле геологической среды скрыто кратными отражениями. Поэтому подошва подводной мерзлоты на разрезе не проявлена в волновой картине.

В работе [38] отмечено, что использование сейсмической скорости для различения содержащих лед и свободных ото льда слоев неэффективно, так как они могут совпадать, создавая сходную волновую картину, особенно в тонкозернистых отложениях.

Как следствие, акустический импеданс у содержащих и не содержащих лед отложений может совпадать. Однако выявление субаквальной мерзлоты на разрезах МОВ ОГТ свидетельствует о том, что на акватории имеются термобарические условия для образования газовых гидратов, что вместе с элементами нефтегазоносной системы, выявленными на изученном разрезе, характеризуют данный резервуар как газогидратный.

На сейсмическом разрезе по фрагменту профиля 1305_20С были выявлены две потенциально

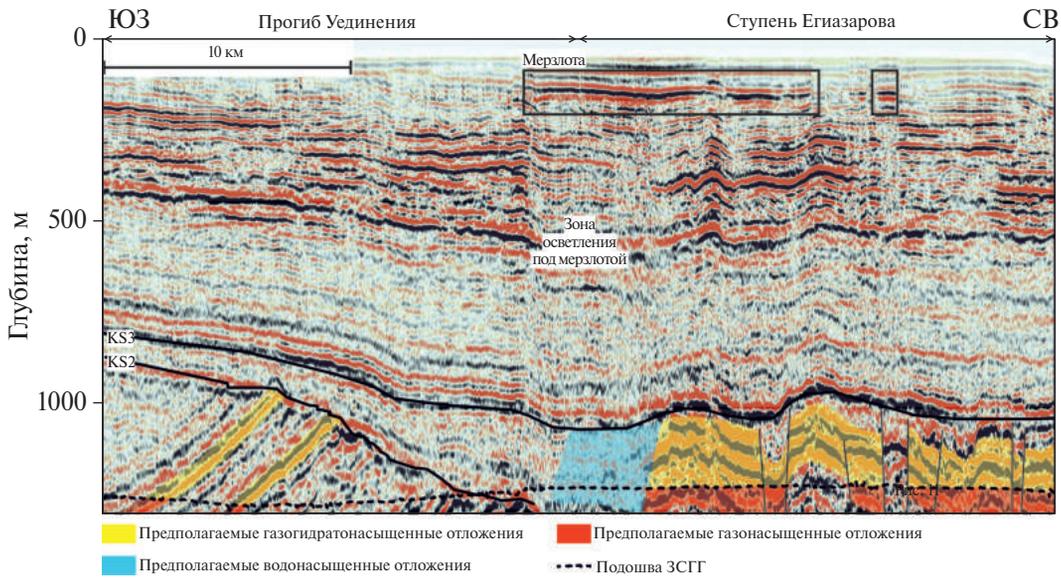


Рис. 11. Сейсмический разрез по фрагменту профиля 1305_20С.

Показаны прогнозируемые подмерзлотные скопления гидратов (затенены желтым). Положение фрагмента профиля – см. рис. 2.

газогидратоносные структуры (см. рис. 2, положение фрагмента профиля).

Первая структура представляет собой стратиграфическую ловушку, экранированную поверхностью несогласия KS-2, которая, возможно, представлена толщей глин (рис. 11).

Структура выделяется по явному несогласию и ограничена двумя высокоамплитудными рефлексорами, имеет размер 5 км и находится на поддонной глубине 1000 м.

Вторая структура представлена ловушкой сводово-стратиграфического типа, экранированной поверхностью несогласия KS-3, с которой также связан региональный флюидоупор на поддонной глубине около 1000 м (см. рис. 11).

В пределах выделенной структуры наблюдаются признаки как ловушки сводового типа – антиклиналь по горизонту KS-3, так и стратиграфической ловушки – явное угловое несогласие. Размер структуры составляет ~20 км. На значительную газонасыщенность здесь указывает высокий уровень амплитуд отраженного сигнала в сравнении со вмещающими толщами. В верхней части разреза также выявлена мерзлота островного типа (см. рис. 10).

Северо-Михайловская депрессия. Мощность осадочного чехла достигает здесь 5 км. Данный участок характеризует фрагмент профиля 130811_11А, захватывающий центральную часть Северо-Михайловской депрессии, обрамленной структурами Североземельского выступа (см. рис. 2, положение фрагмента профиля; рис. 12, а).

Стратиграфия и углеводородные системы на этом участке, предположительно, сопоставимы с аналогичными характеристиками прогиба Уединения. Полагаем, что верхний структурный этаж также сложен осадочными толщами терригенного генезиса мезозойского возраста, а с угловыми несогласиями, наблюдаемыми на сейсмическом разрезе связаны флюидоупоры.

Этот разрез расположен в пределах ЗСГГ, на нем по волновым характеристикам выявляются:

- реликты подводной мерзлоты;
- признаки разгрузки газа в ЗСГГ;
- диапировая структура, что может служить дополнительным фактором гидратообразования за счет аномально высокого пластового давления в ее пределах;
- множественные аномалии, показывающие наличие локальных потенциально газогидратоносных объектов.

Стратиграфическая схема характеризует элементы газогидратного резервуара на фрагменте профиля 130811_11А в Северо-Михайловской депрессии (см. рис. 12, а).

В отличие от двух других участков, здесь серия ярких пятен приурочена к интервалу ЗСГГ, совпадающему с прогнозируемыми реликтами подводной мерзлоты.

Таким образом, если предполагать, что многочисленные яркие пятна являются скоплениями газовых гидратов, то они должны классифицироваться как внутримерзлотные.

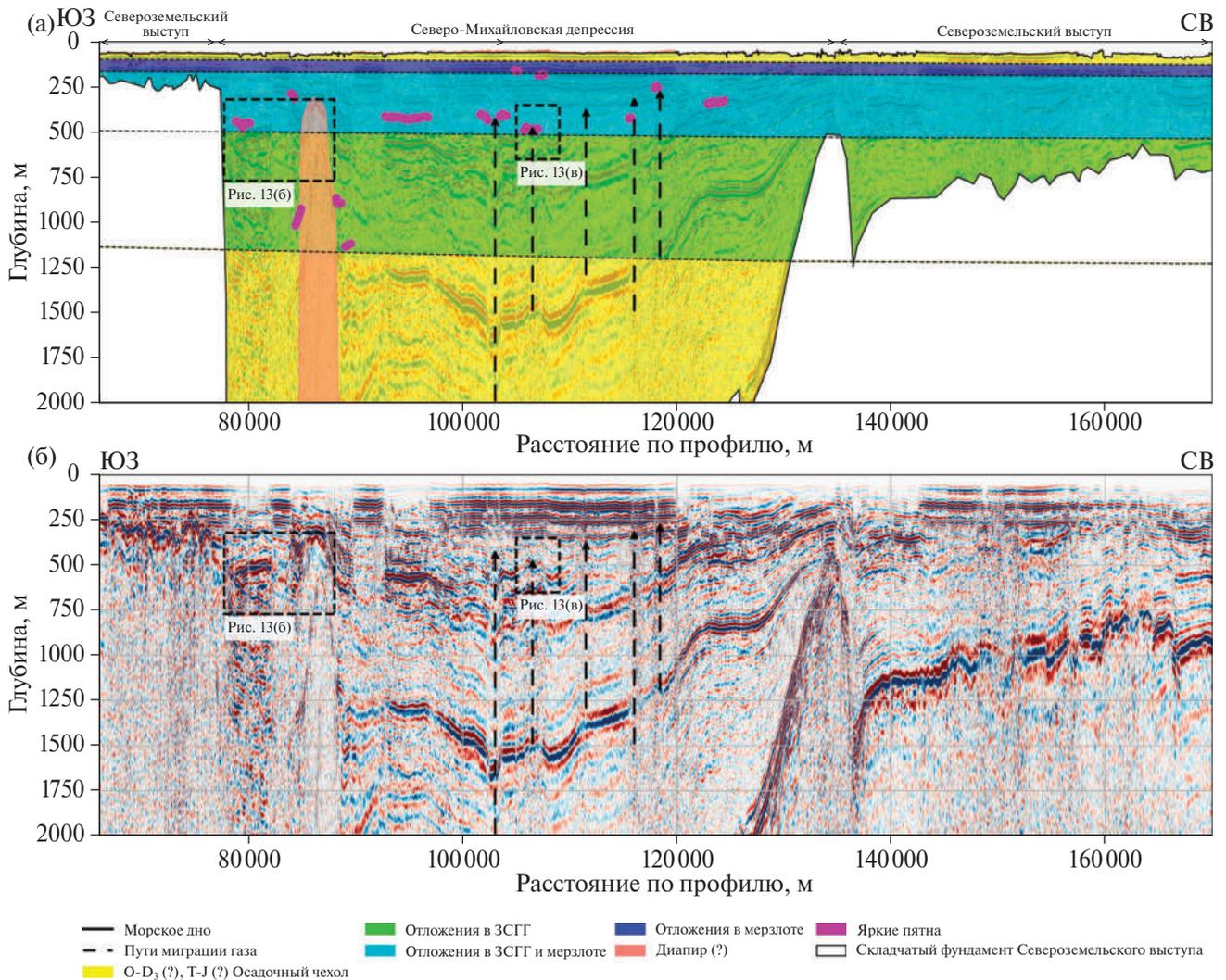


Рис. 12. Стратиграфическая схема на фрагменте профиля 130811_11А, характеризующая элементы газогидратного резервуара в Северо-Михайловской депрессии.

(а) – Северо-Михайловская депрессия;
 (б) – сейсмический разрез по фрагменту профиля 130811_11А.
 Положение фрагмента профиля – см. рис. 2.

Исключение составляют усиленные отражения вблизи диапировой структуры, возникновение которых, скорее, связано с соляной тектоникой, чем с гидратообразованием. Детальное рассмотрение амплитудных характеристик по верхней части сейсмического разреза фрагмента 130811_11А показало, что подводная мерзлота на изучаемом участке акватории имеет островной характер (рис. 13).

Точно такая картина наблюдается на небольшом участке профиля 1305_20С, который находится в границах Северо-Михайловской депрессии (см. рис. 2, положение профиля; см. рис. 10).

Для наглядности амплитуды отраженного от морского дна вынесены на отдельный график (см. рис. 13, а).

Высокие значения амплитуд хорошо маркируют контуры островов мерзлых отложений (см. рис. 13, высокие амплитуды сигнала выделены красным).

Между островами на разрезе наблюдаются вертикальные акустически прозрачные зоны, вероятно, маркирующие положение таликов. Предполагаемая мощность мерзлых отложений, характеризующихся высокими амплитудами, достигает 400 м, – это не истинная, а минимальная мощность из-за чувствительности метода.

Показаны ловушки углеводородов, которые могут являться скоплениями газогидратов (см. рис. 13, а).

В частности, в юго-западной части фрагмента профиля на поддонной глубине 300–350 м

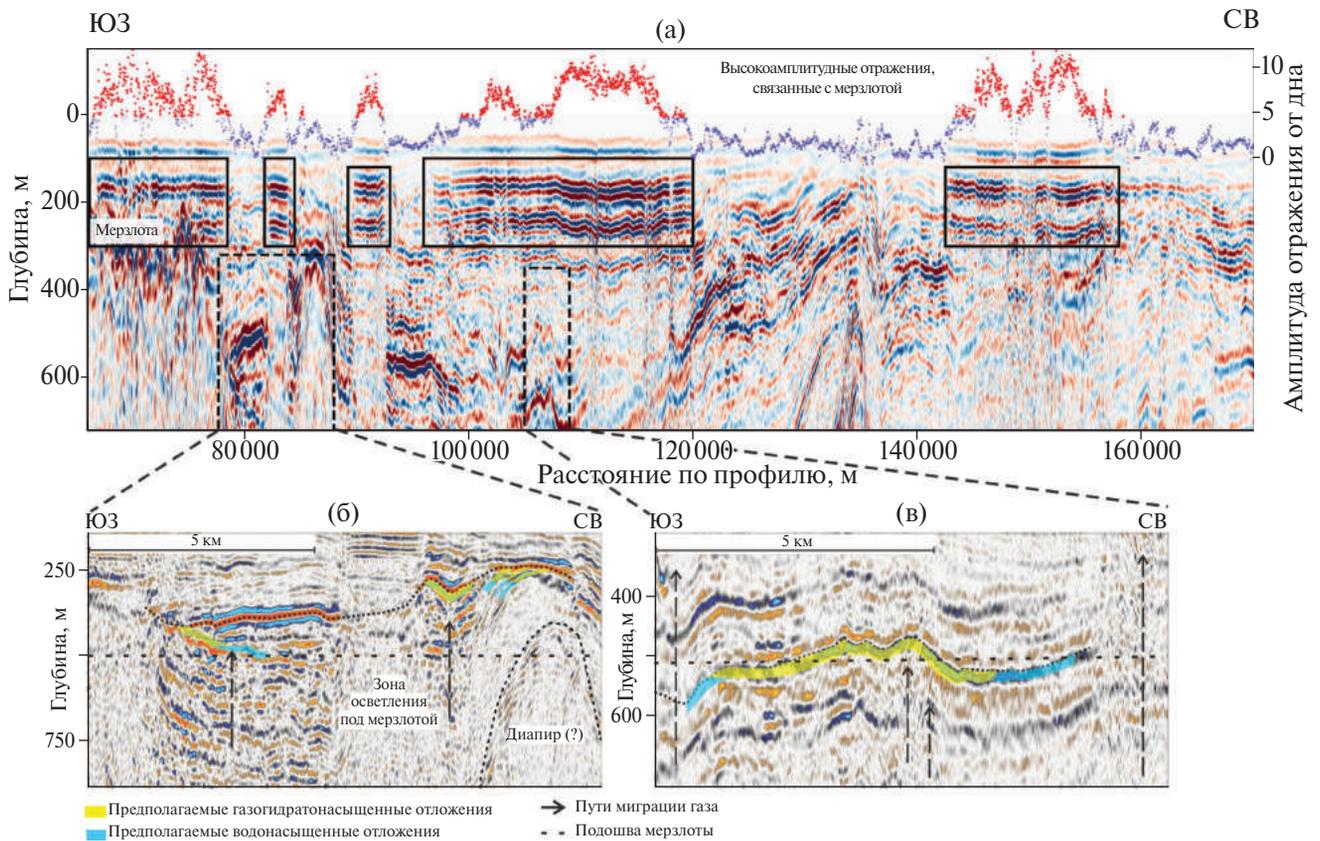


Рис. 13. Сейсмический разрез по верхней части фрагмента профиля 130811_11А с выявленной мерзлотой и прогнозируемые скопления гидратов газа.

(а) – интерпретация РПМ на сейсмическом разрезе; над профилем вынесены значения амплитуд отраженного от дна сигнала;

(б) – на укрупненном участке разреза желтым цветом затенены ловушки стратиграфического и сводово-стратиграфического типов (стрелки показывают вертикальную миграцию газа);

(в) – на укрупненном участке разреза желтым цветом затенена ловушка сводового типа (стрелки показывают вертикальную миграцию газа).

Положение фрагмента профиля – см. рис. 2.

о контурена ловушка стратиграфического типа размером 3–4 км (см. рис. 13, б).

На разрезе отчетливо выделяется несогласие с ярким отражением от поверхности размыва. Ниже несогласия на глубине 50–100 м наблюдаются усиленные отражения с обратной полярностью типа “яркое пятно” (см. рис 13, б).

Отсутствие признаков мерзлоты над ловушкой и вертикальная миграция газа могут свидетельствовать о деградации реликтов подводной мерзлоты. Сейсморазведочных признаков мерзлоты в пределах ловушки выявить не удалось.

Другая ловушка находится в северо-восточной части этого же фрагмента профиля 130811_11А. Показаны контуры сводово-стратиграфической ловушки в сводовой части антиклинальной структуры над диапиром (см. рис. 13, б).

Структура имеет горизонтальный размер ~4 км, расположена на поддонной глубине

~250 м и характеризуется совокупностью признаков стратиграфической ловушки углеводородов, экранированной поверхностью несогласия, и ловушки сводового типа, связанной с деформацией отложений в результате внедрения диапира. Ловушка находится выше расчетной подошвы подводной мерзлоты и по модельным данным, вероятно, являет собой пример внутри-мерзлотного скопления гидратов газа. Однако на сейсмическом разрезе мерзлые породы над ловушкой не прослежены, но признаки мерзлоты наблюдаются к юго-западу и северо-востоку от ловушки. Возможно, это скопление газогидратов является подмерзлотным.

Выделено локальное поднятие, горизонтальный размер которого достигает 6–7 км, при этом вертикальный размер составляет всего 100 м (см. рис. 13, в).

В сводовой части поднятия наблюдаются усиление амплитуд отраженного сигнала, ниже сводовой части определяется вертикальная зона сниженной коррелируемости отражений, что свидетельствует о возможной миграции газа в антиклинальную структуру. Поскольку подошва мерзлоты не проявлена на сейсмическом разрезе, мы полагаем, что это — подмерзлотное скопление газогидратов.

ВЫВОДЫ

1. Выполненные модельные прогнозы пространственного и вертикального распространения подводной криолитозоны и зоны стабильности газовых гидратов позволили охарактеризовать условия формирования связанных с подводной мерзлотой метановых гидратов в Карском море.

2. Исходя из анализа данных бурения через льдосодержащие породы, опубликованных работ и по результатам моделирования, сделан вывод о преимущественно островном или редкоостровном характере распространения реликтов подводной мерзлоты к западу от 80° в.д. и их возможном сплошном залегании к востоку от 80° в.д. на шельфе Карского моря.

3. Зона стабильности газовых гидратов, ассоциируемая с подводной мерзлотой, коррелирует с ними по характеру распространения. Поэтому наиболее благоприятные условия для гидратообразования прогнозируются в Северо-Карском бассейне, включая Притаймырский шельф, с его высоким газогенерационным потенциалом и мощными мерзлыми толщами, достигающими по модели толщины более 600 м и обуславливающими мощность модельной зоны стабильности газовых гидратов ~ 1400 м.

4. На основе изучения геологического строения, имеющихся и полученных данных, интерпретации цифровых разрезов МОВ ОГТ и их атрибутивного анализа, а также моделирования зон стабильности газовых гидратов и подводной криолитозоны впервые охарактеризован криогенный газогидратный резервуар на трех структурно-тектонических единицах Притаймырского шельфа Карского моря: прогибе Уединения, ступени Егиазарова и Северо-Михайловской депрессии.

5. По материалам МОВ ОГТ прослежены перспективные в отношении газовых гидратов интервалы осадочного разреза. Газогидратный резервуар характеризуется мощностью от 800 до 1100 м, приурочен к О–S карбонатным коллекторам, и S–D и T–J терригенным коллекторам (ра-

нее датированным возрастами S_2 – P_1 , P_1 –T и J–K на основе сейсмостратиграфии); к регионального масштаба флюидоупорам, сформированным по поверхностям размыва в силуре и девоне–триасе; а также к непроницаемым льдосодержащим отложениям, играющим роль локальных покрышек.

6. По данным сейсморазведки определено, что льдосодержащие толщи имеют островное распространение. На это указывают меняющиеся амплитудные характеристики верхней части разреза, зоны вертикальной фильтрации газа, маркируемые аномалиями типа “газовая труба” между выявленными реликтами подводной мерзлоты, и интервалы разреза, в которых, по данным численного моделирования, имеются благоприятные условия для образования газогидратов и сохранения реликтов подводной мерзлоты.

7. Отмечена роль солянокупольной тектоники в формировании газогидратного резервуара из-за аномально высокого пластового давления, повышенной флюидодинамики и формирования ловушек антиклинального типа.

8. Локализованы потенциальные скопления газовых гидратов, приуроченные к ловушкам сводового, стратиграфического, и сводово-стратиграфического типов. В прогибе Уединения обнаружено одно потенциальное скопление газовых гидратов, приуроченное к отложениям O–S (датированных ранее C– P_1). Скопление характеризуется активной флюидодинамикой. Одно скопление находится в отложениях S–D (по предшествующим данным, P_1 –T) возраста ступени Егиазарова. Три скопления в Северо-Михайловской депрессии приурочены к диапировой структуре, стратиграфическим несогласиям и антиклинальным структурам, возможно, скопления находятся в толще S–D (ранее – P_1 –T) возраста, где наблюдаются признаки газонасыщения и/или миграции газа в область аккумуляции — зоны с активным флюидодинамическим режимом.

9. На основе интерпретации данных МОВ ОГТ, данных бурения и сопоставления их с модельными расчетами в зоне стабильности метановых гидратов авторами впервые охарактеризован резервуар криогенных газовых гидратов на Притаймырском шельфе Карского моря, определена его мощность, морфология, дана предварительная сейсмостратиграфическая привязка, выявлены мерзлые отложения и подмерзлотные ловушки стратиграфического, сводового и сводово-стратиграфического типов.

Благодарности. Авторы признательны рецензенту Ю.А. Воложу (ГИН РАН, г. Москва, Россия)

и анонимному рецензенту за конструктивные замечания, которые помогли улучшить рукопись, авторы признательны редактору М.Н. Шуплецов (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

Финансирование. Работа выполнена в рамках тематических и опытно-методических работ по обоснованию минерально-сырьевой базы нетрадиционных источников углеводородного сырья на акваториях Российской Федерации по государственному заданию ФГБУ “ВНИИОкеангеология”.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева А.К., Руденко М.Н., Зуйкова О.Н. и др. “Обеспечение геологоразведочных работ на углеводородное сырье на континентальном шельфе РФ, в Арктике и Мировом океане в 2019–2021 гг.” – Отчет о проведении тематических и опытно-методических работ, связанных с геологическим изучением недр. – Государственное задание Федерального агентства по недропользованию № 049-00018-19-00. – Отв. исп. А. К. Алексеева – СПб: ВНИИОкеангеология, 2019. 227 с.
2. Алексеева А.К., Руденко М.Н., Зуйкова О.Н. “Обеспечение геологоразведочных работ на углеводородное сырье на континентальном шельфе РФ, в Арктике и Мировом океане в 2019–2021 гг.” – Отчет о проведении тематических и опытно-методических работ, связанных с геологическим изучением недр. – Государственное задание Федерального агентства по недропользованию № 049-00018-20-03. – Отв. исп. А.К. Алексеева. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2020. 183 с.
3. Васильева Е.А., Понина В.А., Петрушина Е.П. “Региональное изучение геологического строения и оценка перспектив нефтегазоносности южной периклинали Северо-Карского бассейна.” – Отчет по ГК № 01/04/331-13. Мурманск, 2009.
4. Верба М.Л., Дараган-Суцова Л.А., Павленкин А.Д. Рифтогенные структуры Западно-Арктического шельфа по данным КМПВ // Советская геология. 1990. № 12. С. 36–47.
5. Вержбицкий В.Е., Мурзин Р.Р., Васильев В.Е., Малышева С.В., Ананьев В.В., Комиссаров Д.К., Рослов Ю.В. Новый взгляд на сейсмостратиграфию и углеводородные системы палеозойских отложений Северо-Карского шельфа // Нефтяное хозяйство. 2011. № 12. С. 18–21.
6. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Геологические модели газогидратообразования // Литология и полезные ископаемые. 1990. №2. С. 76–87.
7. Грамберг И.С., Косыко М.К., Погребницкий Ю.Е. Тектоническая эволюция арктических шельфов Сибири в рифее-мезозое // Советская геология. 1986. № 8. С. 60–72.
8. Григорьев Н.Ф., Карнов Е.Г. К происхождению пластовой залежи подземного льда на р. Енисее у широты Полярного круга. – В кн.: Пластовые льды криолитозоны. – Якутск: ИМ СО АН СССР, 1982. С. 62–71.
9. Гриценко И.И., Костюхин А.И., Паялов В.А. и др. “Подводный переход через Байдарацкую губу в составе магистрального газопровода Ямал–Торжок–Ужгород.” – Отчет за 1988–1990 гг. – Отв. исп. И. И. Гриценко – Мурманск: АМИГЭ–Союзморинжгеология, 1990. Кн. 1. 196 с.
10. Дараган-Суцова Л.А., Петров О.В., Дараган-Суцов Ю.И., Васильев М.А. Особенности геологического строения Северо-Карского шельфа по сейсмическим данным // Региональная геология и металлогения. 2013. № 54. С. 5–16.
11. Конторович В.А., Лунев Б.В., Лабковский В.В. Геолого-геофизическая характеристика Анабаро-Хатангской нефтегазоносной области; численное моделирование процессов формирования соляных куполов (Сибирский сектор Российской Арктики) // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 2. С. 459–470.
12. Куликов С.Н., Скурихин В.А., Рудницкий О.А. и др. Донное опробование в составе инженерно-геологических изысканий на глубоководном участке по проекту “Система магистральных газопроводов Бованенково–Ухта. – Переход через Байдарацкую губу.” – Технический отчет по объекту. – Мурманск: АМИГЭ, 2007. 64 с.
13. Куликов С.Н., Рокос С.И. Выделение массивов многолетнемерзлых пород на временных сейсмоакустических разрезах мелководных районов Печорского и Карского морей // Геофизические изыскания. 2017. № 3. С. 34–42.
14. Малышев Н.А., Никишин В.А., Никишин А.М. и др. Новая модель формирования Северо-Карского осадочного бассейна // ДАН. 2012. Т. 445. № 1. С. 50–54.
15. Малышев Н.А., Вержбицкий В.Е., Скарятин М.В., Балагуров М. Д., Илюшин Д.В., Колюбакин А.А., Губарева О.А., Гатовский Ю.А., Лакеев В.Г., Лукашев Р.В., Ступова А.В., Сулова А.А., Обметко В.В., Комиссаров Д.К. Стратиграфическое бурение на севере Карского моря: первый опыт реализации проекта и предварительные результаты // Геология и геофизика. 2023. Т. 4. № 3. С. 46–65.
16. Мельников В.П., Спасивцев В.И. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. – Под ред. Н.М. Давиденко – Новосибирск: Наука, 1995. 195 с.
17. Неизвестнов Я.В. Мерзлотно-гидрогеологические условия зоны арктических шельфов СССР. – В Сб.: Криолитозона Арктического шельфа. – Под ред. В.И. Соломатина, Л.А. Жигарева – Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1981. С. 18–28.
18. Никишин В.А. Эвапоритовые отложения и соляные диапиры прогиба Урванцева на севере Карского моря // Вестн. МГУ. Сер. Геол. 2012. № 4. С. 54–57.
19. Никишин В.А. Внутриплитные и окраинноплитные деформации осадочных бассейнов Карского моря. – Дис. ... к. г.-м. н. М.: МГУ, 2013. 137 с.

20. *Потапкин Ю.В., Рокос С.И., Галка Ю.Г. и др.* Отчет по объекту “Комплексные инженерно-геологические, инженерно-гидрометеорологические и инженерно-геодезические изыскания на морском продолжении площади Харасавэйской структуры для подготовки к поисково-разведочному бурению”. – Отв. исп. Ю. В. Потапкин – Мурманск: АМИГЭ, 2002. 108 с.
21. *Рекант П.В., Васильев А.А.* Распространение субаквальных многолетнемерзлых пород на шельфе Карского моря // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 4. С. 69–72.
22. *Рокос С.И., Тарасов Г.А.* Газонасыщенные осадки губ и заливов южной части Карского моря // Бюлл. Комис. по изучению четвертичного периода. 2007. Вып. 67. С. 66–75.
23. *Рокос С.И., Длугач А.Г., Локтев А.С., Костин Д.А., Куликов С.Н.* Многолетнемерзлые породы шельфа Печорского и Карского морей: генезис, состав, условия распространения и залегания // Инженерные изыскания. 2009. № 10. С. 38–41.
24. *Рокос С.И., Куликов С.Н., Коротков С.В.* “Инженерные изыскания (2 площадки) в пределах Круженштернского участка.” – Технический отчет по объекту. – Мурманск: АМИГЭ, 2011. 190 с.
25. *Рокос С.И., Куликов С.Н., Скурихин В.Н., Соколов В.П.* Стратиграфия и литология верхней части разреза акватории Обской и Тазовской губ Карского моря // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2020. № 7. С. 164–167.
26. *Рокос С.И., Костин Д.А., Тулапин А.В., Куликов С.Н., Арушанян Л.А.* Мерзлые и охлажденные грунты акватории Байдарацкой губы // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2022. № 9. С. 222–227.
27. *Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Тумской В.Е., Григорьев М.Н., Хуббертен Х.В., Зигерт К.* Термокарст и его роль в формировании прибрежной зоны шельфа моря Лаптевых // Криосфера Земли. 1999. Т. 3. № 3. С. 79–91.
28. *Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Тумской В.Е., Холодов А.Л.* Криолитозона Восточно-Сибирского Арктического шельфа // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2003. №4. С. 51–56.
29. *Романовский Н.Н., Хуббертен Х.В.* Криолитозона и зона стабильности гидратов газов на шельфе моря Лаптевых (основные результаты десяти лет российско-германских исследований) // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 3. С. 61–68.
30. *Романовский Н.Н., Тумской В.Е.* Ретроспективный подход к оценке современного распространения и строения шельфовой криолитозоны Восточной Арктики // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 1. С. 3–14.
31. *Соловьев В.А., Гинсбург Г.Д., Телепнев Е.В., Михалюк Ю.Н.* Криогеотермия и гидраты природного газа в недрах Северного Ледовитого океана – Л.: Севморгеология, 1987. 150 с.
32. *Супруненко О.И., Медведева Т.Ю., Каминский В.Д., Черных А.А., Суворова Е.Б.* Карское море – перспективный полигон для изучения и освоения углеводородных ресурсов // Neftegaz.RU [Электронный ресурс]. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/geologorazvedka/551685-karskoe-more-poligon-dlya-izucheniya-uv-resursov-shelfa/>.
33. Тектоническая карта Арктики. – Под ред. О.В. Петрова, М. Пубелье – СПб.: ВСЕГЕИ, 2019. 1 л.
34. *Хуторской М.Д., Ахмедзянов В.Р., Ермаков А.В., Леонов Ю.Г., Подгорных Л.В., Поляк Б.Г., Сухих Е.А., Цыбуля Л.А.* Геотермия Арктических морей. – Под ред. Ю.Г. Леонова – М.: ГЕОС, 2013. 232 с. (Тр. ГИН РАН. Вып. 605).
35. *Шарабатян А.А.* Экстремальные оценки в геотермии и геокриологии – М.: Наука, 1974. 124 с.
36. *Шуилов Э.В., Шкарубо С.И.* Современные проблемы геологии и тектоники осадочных бассейнов Евразийско-Арктической континентальной окраины. – Т. 1. – Литолого- и сейсмостратиграфические комплексы осадочных бассейнов Баренцево-Карского шельфа – Под ред. Г.Г. Матишова – Апатиты: ММБИ КНЦ РАН, 2010. С. 266.
37. *Athy L.F.* Density, porosity and compaction of sedimentary rocks // AAPG Bull. 1930. Vol. 14. P. 1–24.
38. *Brothers L., Hart P., Ruppel C.* Minimum distribution of subsea ice-bearing permafrost on the U.S. Beaufort Sea continental shelf // Geophys. Res. Lett. 2012. Vol. 39. L15501. P. 1–6.
39. *Bukhanov B., Chuvilin E., Zhmaev M., Shakhova N., Spivak E., Dudarev O., Osadchiev A., Spasennykh M., Semiletov I.* In situ bottom sediment temperatures in the Siberian Arctic seas: Current state of subsea permafrost in the Kara sea vs Laptev and East Siberian seas // *Marin. Petrol. Geol.* 2023. Vol. 157. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106467>
40. *Chuvilin E., Bukhanov B., Davleishina D., Grebenkin S., Istomin V.* Dissociation and self-preservation of gas hydrates in permafrost // *Geosciences.* 2018. Vol. 8 (431). P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120431>
41. *Collett T. S., Lee M.W., Dallimore S.R., Agena W.F.* Seismic- and well-log-accumulations on Richards Island. – In: *Scientific Results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate Research Well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada.* – Ed. by S.R. Dallimore, T. Uchida, T.S. Collett – Bull. Geol. Surv. Can. 1999. Vol. 544. 403 pp.
42. *Collett T.S., Lee M.W., Agena W.F., Miller J.J., Lewis K.A., Zyrianova M.V., Boswell R., Inks T.L.* Permafrost-associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope // *Marin. Petrol. Geol.* 2011. Vol. 28. P. 279–294.
43. *Crutchley G.J., Pecher I.A., Gorman A.R., Stuart A.H., Greinert J.* Seismic imaging of gas conduits beneath seafloor seeps in a shallow marine gas hydrate province, Hikurangi Margin, New Zealand // *Marin. Geol.* 2010. Vol. 272. P. 114–126.
44. *Dallimore S.R., Collett T.S.* Scientific Results from the Mallik. – In: *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada.* – (Bull. Geol. Surv. Can. 2005. Vol. 585 (CDROM). No. 957), 140 pp.

45. *De Boer B., Lourens L., van de Wal R.S.W.* Persistent 400,000-year variability of Antarctic ice volume and the carbon cycle is revealed throughout the Plio–Pleistocene // *Nature Communications*. 2014. Vol. 5. No. 2999. P. 1–8.
46. *Fuchs S., Norden B.* The Global heat flow database: Release 2021. – GFZ Data Services, Int. Heat Flow Commis. 2021. <https://doi.org/10.5880/figeo.2021.014>
47. *Gavrilov A., Pavlov V., Fridenberg A., Boldyrev M., Khilimonyuk V., Pizhankova E., Buldovich S., Kosevich N., Alyautdinov A., Ogienko M., Roslyakov A., Cherbunina M., Ospennikov E.* The current state and 125 kyr history of permafrost in the Kara Sea shelf: modeling constraints // *Cryosphere*. 2020. Vol. 14. No. 6. P. 1857–1873.
48. *Grob H., Riedel M., Duchesne M.J., Krastel S., Bustamante J., Fabien-Ouellet G. et al.* Revealing the extent of submarine permafrost and gas hydrates in the Canadian Arctic Beaufort Sea using seismic reflection indicators // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2023. Vol. 24. P. 1–22.
49. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA-5 global reanalysis // *Quarterly J. Royal Meteorolog. Soc.* 2020. Vol. 146. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
50. *Hinz K., Delisle G., Block M.* Seismic evidence for the depth extent of permafrost in shelf sediments of the Laptev Sea, Russian Arctic. – In: *Proc. 7th Int. conf. on permafrost.* – Ed. by A. G. Lewcowicz, M. Allard (Yellowknife, Canada, 1998). P. 453–458.
51. *Hunt J.M.* Petroleum geochemistry and geology. – Ed. by J.H. Staples (Woods Hole Oceanograph. Inst., W.H. Freeman & Co, San Francisco, USA. 1979), 617 pp.
52. *Kholodov A., Romanovskii N., Gavrilov A. et al.* Modeling of the Offshore Permafrost Thickness on the Laptev Sea Shelf // *Polarforschung*. 2001. Vol. 69. No. 6. P. 221–227.
53. *Kvenvolden K.A.* Methane hydrate in the global organic carbon cycle // *Terra Nova*. 2002. Vol. 14. P. 302–306. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00414>
54. *Lellouche J.M., Bourdalle-Badie R., Greiner E., Garric G., Melet A., Bricaud C. et al.* The Copernicus global 1/12 degrees oceanic and sea ice GLORYS12 reanalysis // *Frontier. Earth Sci.* 2021. Vol. 9. P. 1–27.
55. *Li J., Ye J., Qin X., Qiu H., Wu N., Lu Hai-Long, Xie W., Lu J., Peng F., Xu Z., Lu C., Kuang Z., Wei J., Liang Q., Lu Hong-Feng, Kou B.* The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea // *China Geol.* 2018. Vol. 1. P. 5–16.
56. *Liu X., Flemings P.B.* Passing gas through the hydrate stability zone at southern Hydrate Ridge, offshore Oregon // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2006. Vol. 24. P. 211–226.
57. *Malakhova V.V.* The response of the Arctic Ocean gas hydrate associated with subsea permafrost to natural and anthropogenic climate changes // *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 2020. Vol. 606. P. 1–8.
58. *Malakhova V.V., Eliseev A.V.* Uncertainty in temperature and sea level datasets for the Pleistocene glacial cycles: Implications for thermal state of the subsea sediments // *Global and Planetary Change*. 2020. Vol. 192. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103249>
59. *Matveeva T.V., Kaminsky V.D., Semenova A.A., Shchur N.A.* Factors Affecting the Formation and Evolution of Permafrost and Stability Zone of Gas Hydrates: Case Study of the Laptev Sea // *Geosciences*. 2020. Vol. 10. Is.12. P 1–21.
60. *Overduin P. P., Schneider von Deimling T., Miesner F., Grigoriev M., Ruppel C., Vasiliev A., Lantuit H., Juhls B., Westermann S.* Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP) // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2019. Vol. 124. No. 6. P. 3490–3507. <http://dx.doi.org/10.1029/2018JC014675>
61. *Portnov A., Smith A.J., Mienert J., Cherkashov G., Rekant P., Semenov P., Serov P., Vanshtein B.* Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf // *Geophys. Res. Lett.* 2013. Vol. 40. P. 1–6.
62. *Portnov A., Mienert J., Serov P.* Modeling the evolution of climate sensitive Arctic subsea permafrost in regions of extensive gas expulsion at the West Yamal shelf // *Biogeosciences*. 2014. Vol. 119. P. 2082–2094.
63. *Ruppel C.* Methane Hydrates and Contemporary Climate Change // *Nature Education Knowledge*. 2011. Vol. 2. No. 12. P. 1–10.
64. *Ruppel C.* Permafrost-associated gas hydrate: Is it really approximately 1% of the global system? // *J. Chem. Engineer. Data*. 2015. Vol. 60. No. 2. P. 429–436.
65. *Tinivella U., Giustiniani M., Marin-Moren H.* A Quick-Look Method for Initial Evaluation of Gas Hydrate Stability below Subaqueous Permafrost // *Geosciences*. 2019. Vol. 9. No. 329. P. 1–13.
66. Kingdom Software, <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/kingdom-seismic-geological-interpretation>, (Accessed July, 2023).
67. ArcGIS, <https://www.esri.com/en-us/home> (Accessed May, 2023).
68. Julia Programming Language (v.1.6.17), <https://julialang.org/>, (Accessed July 19, 2022).

Geological Characteristics of Subpermafrost Gas Hydrate Reservoir on the Taimyr Shelf of the Kara Sea (Eastern Arctic, Russia)

T. V. Matveeva^{a, *}, A. O. Chazov^{a, b}, Yu. Yu. Smirnov^{a, c}

^a*Gramberg All-Russia Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean (VNIIOkeangeologia), Angliiskiy pr., bld. 1, 190121 Saint-Petersburg, Russia*

^b*Saint-Petersburg State University – Institute of Earth Sciences, Universitetskaya emb., bld. 7/9, 199034 Saint-Petersburg, Russia*

^c*Russian State Hydrometeorological University, Voronezhskaya st., bld. 79, 192007 Saint-Petersburg, Russia*

**e-mail: tv_matveeva@mail.ru*

The conditions for the formation of gas hydrates associated to subsea permafrost in the Kara Sea are predicted based on numerical modeling. The forecast of the distribution of the relic submarine permafrost and related methane hydrate stability zone is given on the basis of solving the equation of thermal conductivity. According to modeling data, an extensive thermobaric relict submarine permafrost zone is predicted within the Kara Sea shelf. The greatest thickness (up to 600 m) of the permafrost is confined to the Taimyr shelf. Based on the results of the analysis of our model, drilling seismic data, the southwestern shelf of the Kara Sea is characterized by insular or sporadic permafrost. In the northeastern part, the nature of permafrost is also discontinuous, despite the greater thickness of the frozen strata. For the first time, accumulations of cryogenic gas hydrates on the Taimyr shelf have been characterized. The new drilling data obtained, seismic data reinterpretation and numerical modeling have shown that the gas hydrate reservoir is confined to unconformably occurring Silurian–Devonian and underlying Triassic–Jurassic strata. The thickness of the gas hydrate reservoir varies from 800 to 1100 m. Based on the interpretation of CDP data and their comparison with model calculations, frozen deposits and sub-permafrost traps of stratigraphic, anticline and anticline-stratigraphic types were identified for the first time. These pioneering studies allowed to characterize the thickness and morphology of the gas hydrate reservoir, giving a preliminary seismostratigraphic reference, and to identify the potentially gas-hydrate bearing structures. Due to favorable thermobaric and permafrost-geothermal conditions, most of the identified traps may turn out to be sub-permafrost accumulations of gas hydrates. In total, at least five potential accumulations of gas hydrates were discovered, confined to structural depressions – Uedineniya Trough and its side included Egiazarov Step and North Mikhailovskaya Depression.

Keywords: Kara Sea, Taimyr shelf, relict subsea permafrost, cryogenic gas-hydrates, gas hydrate accumulations, gas hydrate reservoir, gas hydrate stability zone, numerical modeling, seismic exploration, seismic attributes