

УДК 550.8.012

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ГЕОЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ И ПЕРСПЕКТИВАХ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ШЕЛЬФА ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

Г.А. Заварзина, Д.С. Шапабаева, О.А. Захарова

ООО «Газпромнефть НТЦ», 190000, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 75-79, Россия

Рассмотрены результаты комплексной интерпретации геофизических работ (сейсморазведка МОГТ 2D и гравимагниторазведка), выполненных ООО «Газпромнефть НТЦ» в пределах Северо-Врангелевского лицензионного участка недр на шельфе Восточно-Сибирского моря. Новые геофизические данные позволили актуализировать геологическую модель осадочного чехла в пределах Северо-Врангелевского участка, уточнить границы Дремхедского прогиба, восстановить условия формирования комплексов осадочного чехла и выявить возможные перспективные зоны нефтегазоаккумуляции. В результате работ установлено положение основных стратиграфических несогласий и предложены варианты их интерпретации, выявлено клиноформное строение апт-альбского и кайнозойского комплексов в пределах Дремхедского прогиба. Комплексный анализ геолого-геофизических данных позволил уточнить строение основных структур, прилегающих к прогибу, и выполнить прогноз распространения потенциальных коллекторов и нефтегазоматеринских пород в разрезе осадочного чехла. Целевыми комплексами для постановки нефтегазопромысловых работ являются верхнемеловой и кайнозойский.

Шельф, сейсморазведка МОГТ 2D, осадочный чехол, Дремхедский бассейн, Восточно-Сибирское море

NEWLY ACQUIRED DATA ON THE GEOLOGIC STRUCTURE AND HYDROCARBON POTENTIAL IN THE EASTERN PART OF THE EAST SIBERIAN SEA SHELF

G.A. Zavarzina, D.S. Shapabaeva, O.A. Zakharova

We report results of an integrated interpretation of geophysical data (2D CDP seismic acquisition and gravity and magnetic survey) conducted by Gazpromneft Science and Technology Center in the North Wrangel lease block on the East Siberian Sea shelf. The newly obtained geophysical data have allowed us to update the geological model of the sedimentary cover within the North Wrangel lease block, to clarify the limits of the Drem-Khed Trough, to reconstruct the conditions under which sedimentary complexes formed, and to identify possible promising oil and gas accumulation zones. We were able to determine the position of the main stratigraphic unconformities, to propose several approaches to their interpretation, and to identify the clinoform architecture of the Aptian–Albian and Cenozoic complexes within the Drem-Khed Trough. The integrated review of geological and geophysical data has been helpful in refining the framework of the main structures adjoining the trough and predicting the extent of potential reservoirs and oil and gas source rocks throughout the sedimentary cover. The Upper Cretaceous and Cenozoic complexes are regarded as oil and gas exploration targets.

Shelf, 2D CDP seismic survey, sedimentary cover, Drem-Khed Basin, East Siberian Sea

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы на шельфах Восточно-Сибирского и Чукотского морей выполнен значительный объем сейсморазведочных работ МОГТ 2D как за счет госбюджета, так и за счет компаний ПАО «НК Роснефть» и ПАО «Газпромнефть». По мере поступления новых сейсморазведочных данных в пределах лицензионных участков пересматриваются геологическая модель региона и оценка ресурсов УВ. В то же время остаются значительные неопределенности как в стратиграфической привязке отражающих горизонтов, так и в оценке перспектив нефтегазоносности. Эти неопределенности связаны с отсутствием скважин глубокого бурения на шельфе Российского сектора Восточной Арктики.

На площади Северо-Врангелевского участка недр до 2018 г. плотность сейсморазведочных профилей МОГТ 2D составляла 0.04 км/км². Региональные профили МОГТ 2D располагались преимущественно в южной и восточной частях участка. Центральный и западный районы оставались слабо изученными. В 2017 г. по имеющимся региональным геолого-геофизическим данным была построена сейсмогеологическая модель и выполнена оценка ресурсов УВ [Заварзина и др., 2017, 2019]. Согласно этой модели, разрез осадочного чехла Дремхедского бассейна включал верхнеюрско-нижнемеловой, апт-верхнемеловой и кайнозойский комплексы. В Северо-Чукотском бассейне в основании разреза оса-

дочного чехла предполагалось присутствие отложений карбона—нижней юры. Выделенные и прослеженные сейсмические горизонты сопоставлялись со стратификацией сейсмических разрезов бассейна Северного склона Аляски, который принимался в качестве геологического аналога для оценки ресурсов УВ. В Северо-Аляскинском бассейне открыто несколько десятков нефтяных и газовых месторождений. Нефтегазоматеринские толщи установлены здесь во всем интервале разреза чехла от карбона до палеогена. Кроме этого, в скважинах на шельфе Чукотского моря установлены нефтегазопоявления в породах стратиграфического интервала карбон—верхний мел [Скарятин и др., 2021].

Однако полученные новые сейсморазведочные данные как в Российском секторе, так и в Американском показывают, что проведение аналогии с бассейном Северного склона Аляски является спорным.

В 2018—2019 гг. для уточнения геологической модели и планирования геологоразведочных работ на площади Северо-Врангелевского участка (в центральной и западной частях) были выполнены комплексные геофизические исследования (сейсморазведка МОГТ 2D и гравимагниторазведка). После проведения новых сейсморазведочных работ МОГТ 2D плотность профилей МОГТ 2D в пределах участка составила 0.16 км/км². Полученные новые сейсморазведочные данные позволили актуализировать сейсмогеологическую модель, выявить новые перспективные объекты и оценить их ресурсный потенциал.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

В пределах Восточно-Сибирского и Чукотского морей расположены крупные осадочные бассейны: Новосибирский, Северо- и Южно-Чукотский, Дремхедский, Пегтымельский, разделенные поднятиями: Де-Донга, Барановское, Певекское, Шелагское, Врангелевское и Геральдское (рис. 1). Эволюция этих бассейнов неразрывно связана с развитием Северного Ледовитого океана и обусловлена многообразными процессами, основными из которых являются процессы рифтогенеза (раскрытие в позднелюрско(?)—раннемеловое время Канадской впадины, котловины Подводников и в конце мела—начале кайнозоя — Евразийского бассейна), а также орогенез, определивший формирование на юге региона Новосибирско-Чукотской складчатой системы. Образование складчатой области на юге Восточной Арктики связано с коллизией Сибирской платформы и Аляскинско-Чукотского микроконтинента в позднелюрское время, но главный этап становления орогена происходил 132—115 млн л. н. [Лобковский и др., 2010; Лаверов и др., 2012, 2013; Craddock, Houseknecht, 2016; Рекант и др., 2020].

В настоящее время существуют несколько вариантов геологической модели строения шельфов Восточно-Сибирского и Чукотского морей. Однако как иностранными, так и российскими исследователями в строении осадочного чехла выделяются кайнозойский (верхнебрукский), ограниченный в подошве отражающим горизонтом (ОГ) mBU, апт-верхнемеловой (нижнебрукский), ограниченный в подошве



Рис. 1. Тектоническая схема Восточно-Арктического региона с изменениями и дополнениями [Хаин и др., 2009; Лаверов и др., 2012; Петровская и др., 2014].

1 — мезозойские орогены; 2 — структуры Арктического региона; 3 — поднятия, перекрытые осадочным чехлом; 4 — пассивная континентальная окраина с впадинами и поднятиями; 5 — Врангеля-Геральдский разлом (а), надвиг (б); 6 — Северо-Врангелевский лицензионный участок.

ОГ ВУ и верхнеюрско-нижнемеловой («бофортский» или «рифтовый») сейсмокомплексы [Drachev, 2011; Craddock, Houseknecht, 2016; Заварзина и др., 2019; Никишин и др., 2019]. Дискуссионными остаются вопросы положения в разрезе отражающих горизонтов и присутствие в подошве осадочного чехла недислоцированного верхнепалеозойско-триасового интервала разреза.

Вопрос о присутствии в составе осадочного чехла верхнепалеозойско-триасовых отложений базируется на данных сейсморазведки МОГТ 2D, результатов моделирования гравимагнитных материалов и изучения каменного материала, полученного на поднятии Менделеева, а также исследования американских специалистов, обнаруживших свидетельства присутствия нескладчатых палеозойских комплексов на Чукотском плато, поднятии Нортвинд (Центрально-Арктическая область впадин и поднятий) и на востоке Чукотского моря [Sherwood et al., 2002; Орлов и др., 2004; Хаин и др., 2009; Дараган-Суцова и др., 2014; Петровская, Савишкина, 2014; Рекант и др., 2020].

Важным источником геологической информации о строении шельфа Восточно-Сибирского моря являются Новосибирские острова и о. Врангеля. В последние годы опубликована серия работ сотрудников ГИН РАН, ИНГТ СО РАН и др. по детальному строению разрезов мезозоя Новосибирских островов и о. Врангеля [Луцицкая и др., 2017; Соколов и др., 2017; Моисеев и др., 2018; Kostyleva et al., 2019].

На основании этих данных предполагается, что в северной части шельфов Восточно-Сибирского и Чукотского морей осадочный чехол залегает на позднекаледонском складчатом фундаменте, который протягивается от Восточно-Сибирского моря к Аляске. Позднекаледонский орогенез (позднедевонско-раннекаменноугольное несогласие) установлен в восточных районах Арктики, в Арктической Канаде, на северо-востоке Гренландии, на севере Аляски и шельфе Чукотского и Бофорта морей. Позднекремниевый складчатый фундамент выделяется в пределах складчато-надвиговой системы хр. Брукса—Врангеля—Геральда. Граница между областями разновозрастного фундамента проводится по фронту позднекремниевых складок (разлому Врангеля—Геральда) [Орлов и др., 2004; Дараган-Суцова и др., 2014; Петровская, Савишкина, 2014; Рекант и др., 2020; Скарятин и др., 2021].

В рамках второй концепции предполагается, что на всем Восточно-Арктическом шельфе осадочный чехол мел-кайнозойского возраста перекрывает акустический фундамент. В последние годы этой концепции посвящены работы [Craddock, Houseknecht, 2016; Заварзина и др., 2019; Никишин и др., 2019].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходными данными для этой работы являются сейсморазведочные профили МОГТ 2D, полученные в 2018—2019 гг. по сети $(10 \times 10) \times 20$ км в пределах Северо-Врангелевского лицензионного

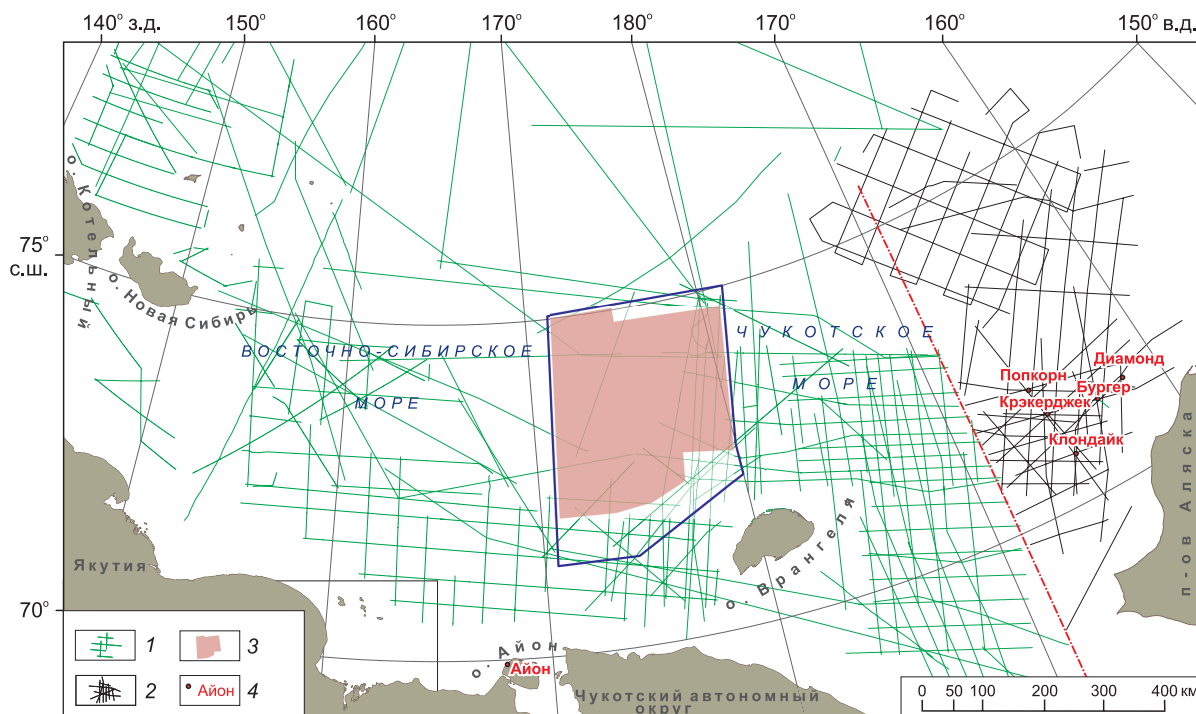


Рис. 2. Схема геофизической изученности Восточно-Арктического региона.

1 — региональные профили МОГТ 2D 1991—2014 гг.; 2 — профили МОГТ 2D в Американском секторе Чукотского моря; 3 — площадь съемки МОГТ 2D 2018—2019 гг. (10×10 — 10×20 км); 4 — скважины.

Эра	Период	Эпоха	Ярус *	Возраст, млн лет	Сейсмический OF (несогласие)	Тектоническое событие **	Возможные НГМТ ***	Возможные коллекторы ***	
Кайнозойская	Четвертичная	Голоцен	Мегхалайский	0.0042					
			Северогриппинский	0.0082					
			Гренландский	0.0117					
		Плейстоцен	Верхний	0.129					
			Чибанский	0.774					
			Калабрийский	1.8					
	Плиоцен	Гелазский	2.58						
		Пьяченцкий	3.6						
	Неогеновая	Миоцен	Занкльский	5.333	MU	Мессинская регрессия (5—7 млн лет)			
			Мессинский	7.246					
			Тортонский	11.63					
			Серравальский	13.82					
			Лангийский	15.97					
			Бурдигальский	20.44					
			Аквитанский	23.03					
	Палеогеновая	Олигоцен	Хаттский	27.82	RU	Предмиоценовое несогласие (23 млн лет), установлено в скв. ACEX на хр. Ломоносова (18—23 млн лет)			
			Рюпельский	33.9					
		Эоцен	Приабонский	37.71	UB	Раскрытие Евразийского бассейна (36—34 млн лет)			
			Бартонский	41.2					
			Лютецкий	47.8					
Палеоцен		Ипрский	56						
		Танетский	59.2	1	Начало спрединга в Евразийском бассейне (56—55 млн лет)				
		Зеландский	61.6						
		Датский	66						
		Маастрихтский	72.1 ± 0.2	mBU	Аплифт и эрозия (66—56 млн лет)				
Мезозойская	Меловая	Верхний	Кампанский	83.6 ± 0.2	LB2	Кампанское несогласие сопоставляется с окончанием вулканизма на поднятии Менделеева (80 млн лет)			
			Сантонский	86.3 ± 0.5					
			Коньякский	89.8 ± 0.3					
			Туронский	93.9					
			Сеноманский	100.5	LB1	Сеноманское несогласие. Кровля аптальбского клиноформного комплекса (100 млн лет). Раскрытие котловины Подводников			
			Альбский	~113.0					
	Нижний	Аптский	~125.0	BU	Завершение позднекреммерийского орогенеза (127—125 млн лет). Вулканизм в районе поднятия Де-Лонга — преаптское несогласие				
		Барремский	~129.4						
		Готервийский	~132.6						
		Валанжинский	~139.8						
	Юрская	Верхний	Берриасский	~145.0	A	Первая фаза позднекреммерийского орогенеза (155—145 млн лет)			
			Титонский	152.1 ± 0.9					
			Кимериджский	157.3 ± 1.0					
		Средний	Оксфордский	163.5 ± 1.0					
Келловейский			166.1 ± 1.2						
Батский			168.3 ± 1.3						
Нижний		Байосский	170.3 ± 1.4						
		Ааленский	174.1 ± 1.0						
		Тоарский	182.7 ± 0.7						
		Плинсбахский	190.8 ± 1.0						
		Синемюрский	199.3 ± 0.3						
		Геттангский	201.3 ± 0.2						

Рис. 3. Стратиграфическая схема с привязкой отражающих горизонтов (несогласий) к основным тектоническим событиям и возможным нефтегазоматеринским толщам и породам-коллекторам.

* ОСШ, 2022.

** [Драчев, 2011, Никишин и др., 2019].

*** [Скарятин и др., 2021].

участка (СВЛУ) и региональные профили ОАО ДМНГ/TGS—NOPEC, ION, ФГУНПП Севморгео и ОАО МАГЭ (рис. 2). Сейсморазведочные работы МОГТ 2D проводились по фланговой системе наблюдений с 108-кратным перекрытием. Длина записи 14 с, шаг дискретизации 2 мс, длина сейсмокося 8100 м. Обработка полевых материалов осуществлялась по графу, включающему восстановление истинного соотношения амплитуд, миграцию Кирхгофа во временной и глубинной областях, постмиграционную обработку. Для создания сейсмогеологической модели и получения единого массива сейсморазведочных данных выполнялась также переобработка региональных профилей МОГТ 2D: ОАО ДМНГ/TGS — NOPEC, ION, ФГУНПП Севморгео и ОАО МАГЭ, которая включала в себя подавление случайных шумов, вторичных пульсаций пузыря источника, линейных помех в тау-пи-области, волны-

спутника за приемник, кратных волн с помощью процедуры SRME и подавление остаточных кратных волн с помощью тау-пи-деконволюции.

Стратиграфическая привязка отражающих горизонтов к скважинам, пробуренным на хр. Ломоносова (скв. АСЕХ), в американской части шельфа Чукотского моря (скв. Клондайк, Бургер, Крэкерджек, Попкорн и Диамонд) и на о. Айон, носит условный характер, так как они расположены на значительном расстоянии от СВЛУ (см. рис. 2). Передача корреляции по региональным профилям МОГТ 2D не позволяет надежно проследить и уверенно идентифицировать основные несогласия в разрезе осадочного чехла, так как существуют значительные различия в качестве полевых данных и графов обработки сейсморазведочных данных. Поэтому стратиграфическая привязка горизонтов выполнялась на основе анализа тектонических событий в Восточно-Арктическом регионе.

В разрезе осадочного чехла прослежены несогласия, характеризующие основные этапы развития Дремхедского бассейна: эрозионная поверхность А (кровля складчатого фундамента), BU (предаптское несогласие), LB1 (кровля апт-альбского комплекса), LB2 (несогласие внутри верхнего мела), mBU (эрозионная поверхность на рубеже мела и палеогена), UB (подошва олигоцена), RU (подошва миоцена) и MU (кровля миоцена) (рис. 3).

С учетом изложенного, для построения сейсмогеологической модели в настоящей работе использовались материалы геологической съемки на прилегающей суше, арх. Новосибирские острова, о. Врангеля и опубликованные геолого-геофизические данные по бассейну Северного склона Аляски [Sherwood et al., 1998, 2002; Craddock, Houseknecht, 2016].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

В предложенной сейсмогеологической модели с учетом новых геофизических данных уточнено положение основных несогласий и геологически обосновано выделение сейсмокомплексов в разрезе осадочного чехла. В сеймостратиграфической схеме отражены тектонические события в Арктическом регионе, освещенные в работах [Sherwood et al., 1998; Кузьмичев и др., 2006; Лобковский и др., 2010; Лаверов и др., 2012; Лаверов и др., 2013; Виноградов и др., 2016; Craddock, Houseknecht, 2016; Никишин и др., 2019; Скарятин и др., 2021]:

ОГ А — эрозионная поверхность, маркирующая кровлю складчатого фундамента, представляет собой динамически выраженную границу регулярной и хаотической записи с отчетливым несогласным взаимоотношением с залегающими выше отложениями. Региональное несогласие (ОГ А), вероятно, обусловлено среднеюрским этапом тектогенеза, последствия которого зафиксированы в глубоких скважинах в американской части шельфа Чукотского моря. В частности, по данным бурения скв. Крэкерджек и Попкорн глубина эрозионного среза охватывает стратиграфический интервал от триаса до средней юры включительно [Sherwood et al., 2006; Петровская, Савишкина, 2014]. ОГ А соответствует первой фазе позднекиммерийского орогенеза (155—145 млн лет) и начальной фазе раскрытия Канадской котловины (155—145 млн лет). Определяющим признаком для идентификации несогласия в пределах СВЛУ является наличие эрозионного среза в прикровельной части складчатого основания (см. рис. 3, 4, а).

ОГ BU (Брукское несогласие) соответствует предаптскому несогласию, установленному на шельфе Аляски [Sherwood et al., 1998; Хаин и др., 2009; Drachev, 2011], и завершению позднекиммерийского орогенеза (127—125 млн лет). К апту—альбу относится и начало базальтовых излияний на поднятии Де-Лонга. Вулканы основного состава с возрастом 127 млн лет вскрыты неглубокой скважиной в коренном выходе на севере поднятия Менделеева [Виноградов и др., 2016]. В Американском секторе Чукотского моря несогласие BU, приуроченное в подошве формации Торок, маркирует подводную эрозию [Drachev, 2011] (см. рис. 4, б).

ОГ LB1 (Нижнебрукское несогласие 1) выделен в кровле клиноформного апт-альбского комплекса и соответствует сеноманскому несогласию (100 млн лет), установленному на шельфе Аляски [Лаверов и др., 2012].

ОГ LB2 (Нижнебрукское несогласие 2) — кампанское несогласие (80 млн лет) сопоставляется с окончанием вулканизма на поднятии Менделеева [Лаверов и др., 2012; Виноградов и др., 2016]. На временных разрезах ОГ LB2 представляет собой несогласие типа «эрозионный срез» (см. рис. 4, в).

ОГ mBU (Среднебрукское несогласие) — региональное несогласие (66—65 млн лет) установлено в скважинах АСЕХ на хр. Ломоносова, Бургер и Крэкерджек на шельфе Аляски. Стратиграфическая привязка ОГ mBU базируется на его сопоставлении с региональной поверхностью выравнивания и развитием коры выветривания на рубеже мела и палеогена [Косько, Ушаков, 2003; Орлов и др., 2004; Хаин и др., 2009; Лаверов и др., 2012; Петровская, Савишкина, 2014; Виноградов и др., 2016; Craddock, Houseknecht, 2016]. Возраст коры выветривания палеоцен-эоценовый (датский—танетский века). На о. Айон кайнозойский разрез пройден скважиной глубиной 671 м, вскрывшей позднекиммерийский фундамент. Выбор главного репера ОГ mBU в разрезе осадочного чехла является определяющим, так как относительно этого горизонта выполнялась привязка остальных несогласий (см. рис. 4, е).

ОГ 1 отождествляется с началом спрединга в Евразийском бассейне (56—53 млн лет).

ОГ UB (Верхнебрукское несогласие) приурочен к поверхности несогласия эрозионного типа, соотносящейся с активизацией тектонических движений и наступлением регрессии моря в конце эоцена—начале олигоцена (36—34 млн лет). На шельфе Восточной Арктики несогласие UB является одной из самых ярких эрозионных поверхностей (см. рис. 4, *ж*). В скважинах Клондайк, Крэкерджек и Попкорн несогласие UB фиксирует глубокий разрыв с выпадением из разреза олигоценовых и миоценовых отложений [Sherwood et al., 2002; Петровская, Савишкина, 2014].

ОГ RU (Региональное несогласие) — предмиоценовое несогласие (23 млн лет) установлено в скв. ACEX на хр. Ломоносова [Дараган-Суцова и др., 2014; Виноградов и др., 2016]. В кайнозойском интервале разрез ОГ RU представляет собой несогласие типа «эрозионный срез» (см. рис. 4, *з*).

ОГ MU (Мессинское несогласие) — связан с несогласием между миоценовыми и плиоценовыми отложениями, образование горизонта может быть обусловлено крупной регрессией Мирового океана — «мессинской регрессией» (5 млн лет) [Орлов и др., 2004; Виноградов и др., 2016].

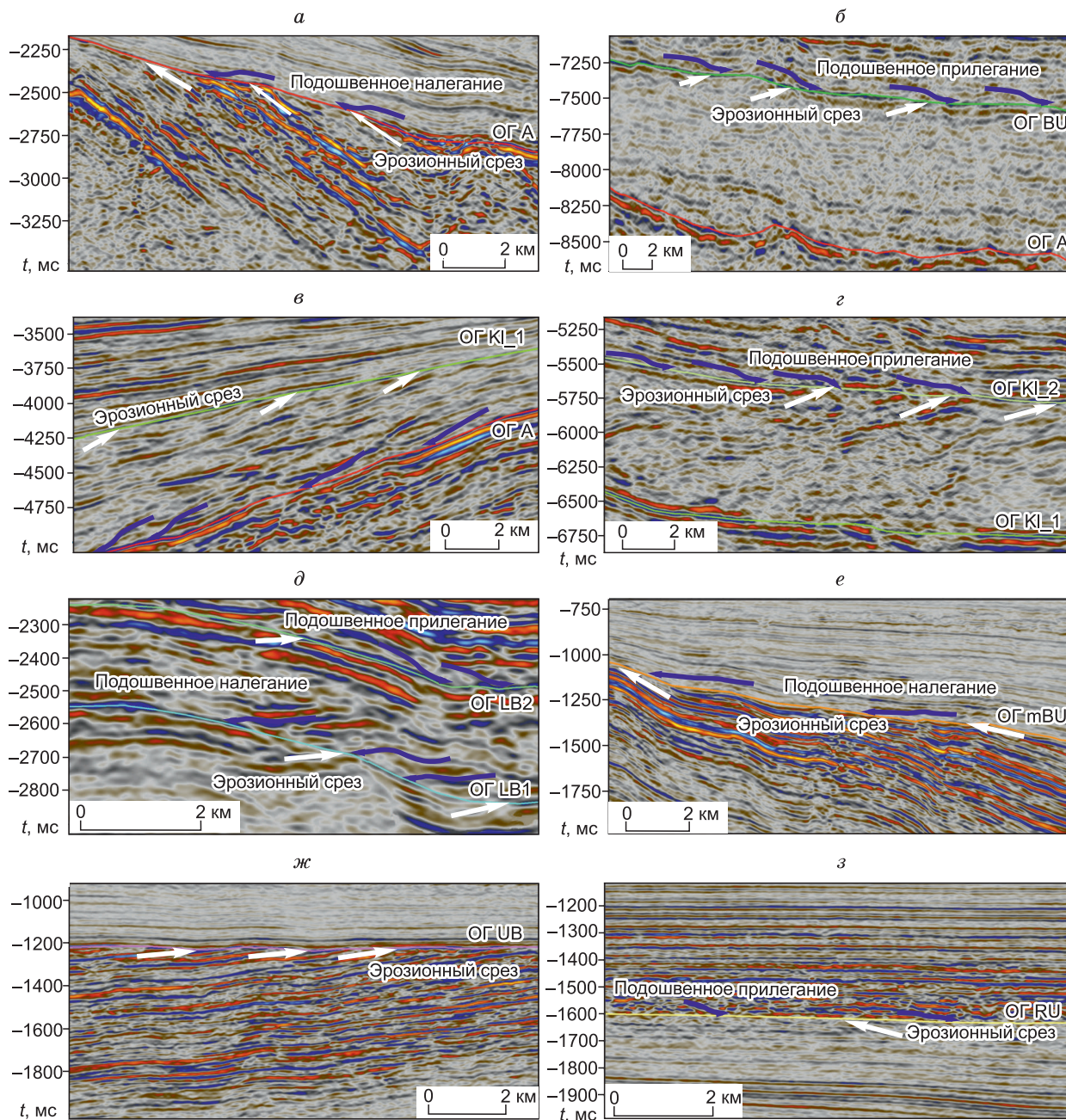


Рис. 4. Характер границ (ОГ) сейсмических комплексов:

a — ОГ А, *б* — ОГ ВU, *в* — ОГ К1_1, *г* — ОГ К1_2, *д* — ОГ LB1—LB2, *е* — ОГ mBU, *ж* — ОГ UB, *з* — ОГ RU.

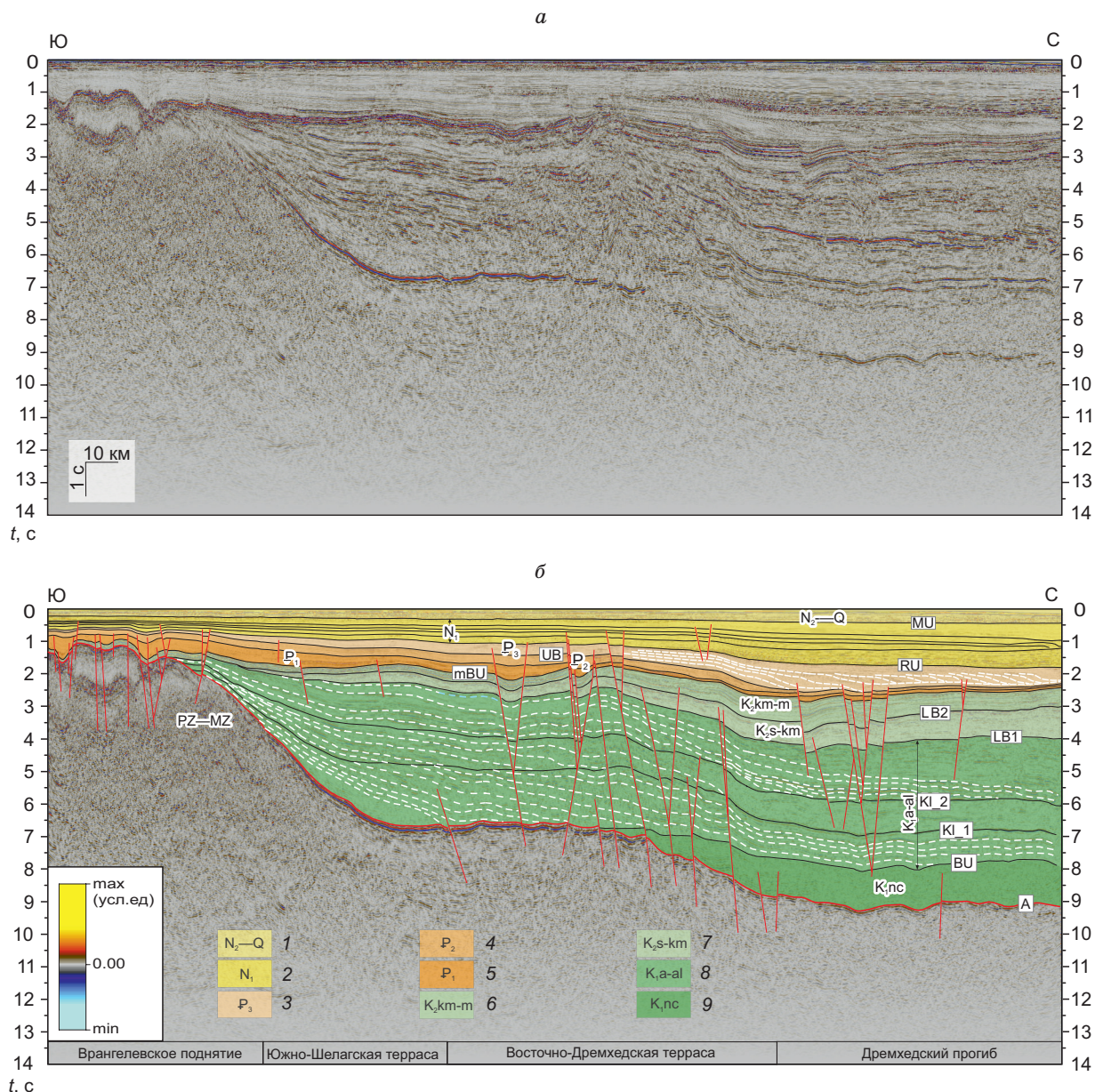


Рис. 5. Временной разрез по сейсмическому профилю А—А' (а) без интерпретации и (б) с интерпретацией.

Положение профиля показано на рис. 7. Сеймостратиграфические комплексы и подкомплексы: 1 — плейстоцен-четвертичный, 2 — миоценовый, 3 — олигоценый, 4 — эоценовый, 5 — палеоценовый, 6 — кампан-маастрихтский, 7 — сеноман-кампанский, 8 — апт-альбский, 9 — неокомский.

На основе сеймостратиграфического анализа в разрезе осадочного чехла Дремхедского бассейна выделены следующие крупные сеймостратиграфические (ССК) комплексы: неокомский (синрифтовый) (А-ВU), апт-альбский (ВU-LB1), верхнемеловой (LB1-mBU) и кайнозойский (mBU-дно моря) (рис. 5—7). Все сеймокомплексы осадочного чехла непрерывно прослеживаются в область континентального склона, последовательно налегая на поверхность складчатого фундамента.

Неокомский (синрифтовый) ССК (А-ВU) в структурном отношении заполняет осевую часть Дремхедского и Северо-Чукотского бассейнов и характеризуется относительно прозрачными слабоволнистыми отражениями (см. рис. 4, б; 7, 8). Мощность комплекса в Дремхедском и Северо-Чукотском прогибах составляет от 1.5—2.6 до 4.5 км. Глубины залегания кровли сеймокомплекса составляют от 11 до 16 км.

В основании синрифтового комплекса в Северо-Чукотском бассейне по аналогии с данными бурения скважин (Клондайк, Бургер, Крэкерджек, Попкорн и Диамонд) мы допускаем присутствие отло-

жений верхней юры, так как «рифтовый» комплекс (формации верхний Кингак и Пейбл Шейл) был выделен в бассейне Северного склона Аляски и сопредельных акваториях на основании бурения скважин, но по сейсмическим данным он выделялся как «рифтовый» или «бофортский» еще задолго до бурения [Sherwood et al., 1998; Drachev, 2011].

Синколлизионные верхнеюрско-неокомские отложения установлены также в западной части Восточно-Арктического региона на о. Бол. Ляховский. Формирование их происходило в передовом прогибе, образованном во время коллизии Анюйско-Святоносской вулканической дуги и Новосибирской платформы [Кузьмичев и др., 2006].

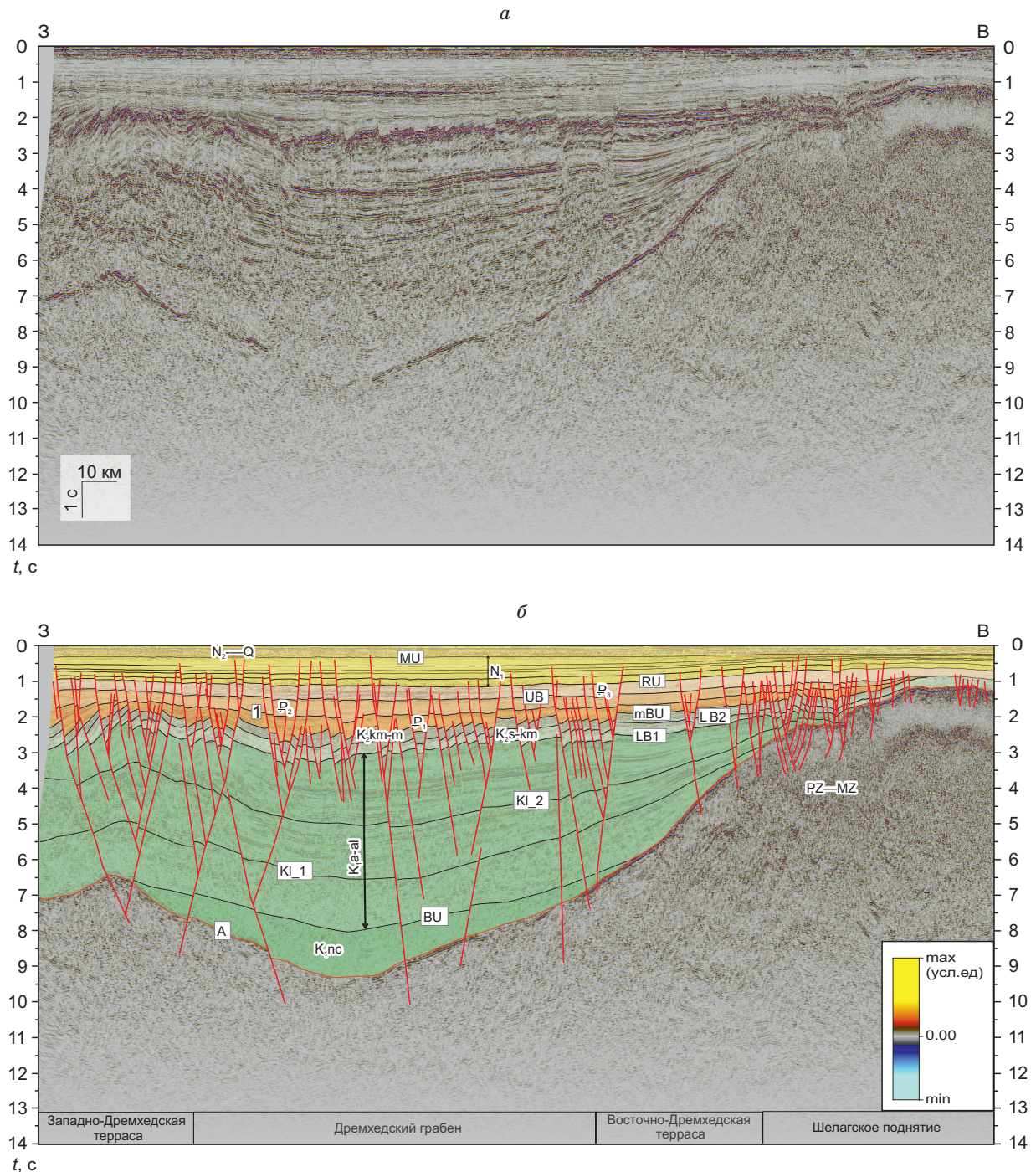


Рис. 6. Временной разрез по сейсмическому профилю В—В' (а) без интерпретации и (б) с интерпретацией.

Положение профиля показано на рис. 7. Усл. обозн. см. на рис. 5.

По геологическим данным, на суше верхнеюрско(?)-неокомский комплекс заполняет синорогенные впадины и представлен континентальными и вулканогенно-осадочными породами [Рекант и др., 2020]. Кровлю синрифтового комплекса ограничивает несогласие ВУ (Брукское), которое фиксирует завершающий этап позднекиммерийского орогенеза, полностью преобразовавшего тектонический облик Чукотки, Северной Аляски, о. Врангеля, шельфа Восточно-Сибирского и Чукотского морей [Петровская, Савишкина, 2014].

С точки зрения перспектив нефтегазоносности синрифтовый комплекс не представляет интереса, поскольку находится на больших глубинах. Неокомский ССК перекрывается мощной толщей клиноформного апт-альбского ССК, ограниченного ОГ ВУ и LB1 в подошве и кровле соответственно.

В апт-альбском ССК выделяется последовательность клиноформных поверхностей, ограничивающих сейсмофациальные единицы с расходящимся косослоистым и сигмовидным рисунком сейсмических отражений, прекращающихся прослеживаться по схеме подошвенного прилегания к кровле подстилающего сейсмокомплекса.

Анализ особенностей строения клиноформных тел позволил выделить внутри апт-альбского комплекса три сеймостратиграфических подкомплекса (ССПК), ограниченных отражающими горизонтами K1_1, K1_2 и LB1 (см. рис. 4, в, г, д; 5, 6, 8).

Нижний ССПК между ОГ ВУ и K1_1 характеризуется слаборасходящимися, практически параллельными, достаточно протяженными, высокоамплитудными отражениями, которые характеризуют ундаформные части клиноформных сейсмофациальных единиц. Отражения характеризуются малыми углами падения, погружение клиноформных поверхностей происходит с юга на север. Формирование этого подкомплекса связано с началом погружения Дремхедского бассейна в аптское время и заполнением осадками, сносимыми с Врангелевского, Геральдского и Певекского поднятий, расположенных на юге. Основным депоцентром осадконакопления в аптское время являлась южная часть Дремхедского бассейна, примыкающая к Барановско-Певекской складчатой зоне. Мощность клиноформной толщи (ОГ ВУ и K1_1) здесь составляет 4.5—6.5 км.

Отличительной особенностью среднего ССПК между ОГ K1_1 и K1_2 является наличие различных типов клиноформных тел (см. рис. 5). В основании комплекса отмечаются тела с хаотическими границами, что указывает на высокую динамику процессов седиментации, возможно, связанных с мощными оползневыми потоками и разнонаправленными клиноформными телами. На отдельных участках хаотические отражения комплекса сменяются достаточно амплитудными выдержанными отражениями с большими углами наклона. Погружение клиноформных поверхностей происходит со стороны Барановского, Певекского, Врангелевского и Шелагского поднятий.

Верхний ССПК между ОГ K1_2 и LB1 представлен сигмовидным и косослоистым рисунком сейсмических отражений, прекращающихся прослеживаться по схеме подошвенного прилегания к кровле подстилающего среднего ССПК.

Сигмовидный рисунок отражений, характеризующихся переменной амплитудной выразительностью, наблюдается в центральной и северной частях Дремхедского бассейна (см. рис. 5). Ундаформные и клиноформные сегменты сейсмофациальных единиц последовательно смещаются в северном и северо-восточном направлении, что говорит о проградации с юга, юго-запада и юго-востока. Мощность и характер напластования сейсмофациальных единиц комплекса свидетельствует об относительно быстром прогибании бассейна и лавинном темпе осадконакопления.

Аккумуляция мощных, преимущественно аллювиальных, косослоистых толщ происходила за счет размыва и интенсивного сноса обломочного материала с приподнятых областей Врангелевско-Геральдской и Барановско-Певекской зон поднятий.

Отложения апт-альбского комплекса формировались в прибрежно-морских и морских условиях. В центральной части Дремхедского бассейна мелководно-морские фации переходят в фации углубленного шельфа и далее на север в склоновые и глубоководные.

Предполагается, что отложения апт-альбского комплекса будут представлены преимущественно песчаниками, алевролитами и глинистыми породами. Так как поступление терригенного материала происходило в режиме лавинной седиментации, можно предположить, что коллекторские свойства пластов-коллекторов будут не очень высокими.

Возможные нефтегазоматеринские толщи (НГМТ) апт-альбского комплекса могли генерировать углеводороды (см. рис. 3). В наиболее погруженной части Дремхедского прогиба прогнозные НГМТ находятся на поздней стадии генерации газа [Заварзина и др., 2017; Скарятин и др., 2021].

Верхнемеловой ССК, ограниченный ОГ mBU и LB1 в кровле и подошве соответственно, распространен в центральной и северной частях Северо-Врангелевского участка недр. Он включает в себя два подкомплекса, разделенных ОГ LB2, резко отличающихся по волновой картине: акустически прозрачную толщу внизу (сеноман-кампанский ССПК) и насыщенную протяженными высокоамплитудными рефлекторами вверху (кампан-маастрихтский ССПК). Волновая картина сеноман-кампанского ССПК и

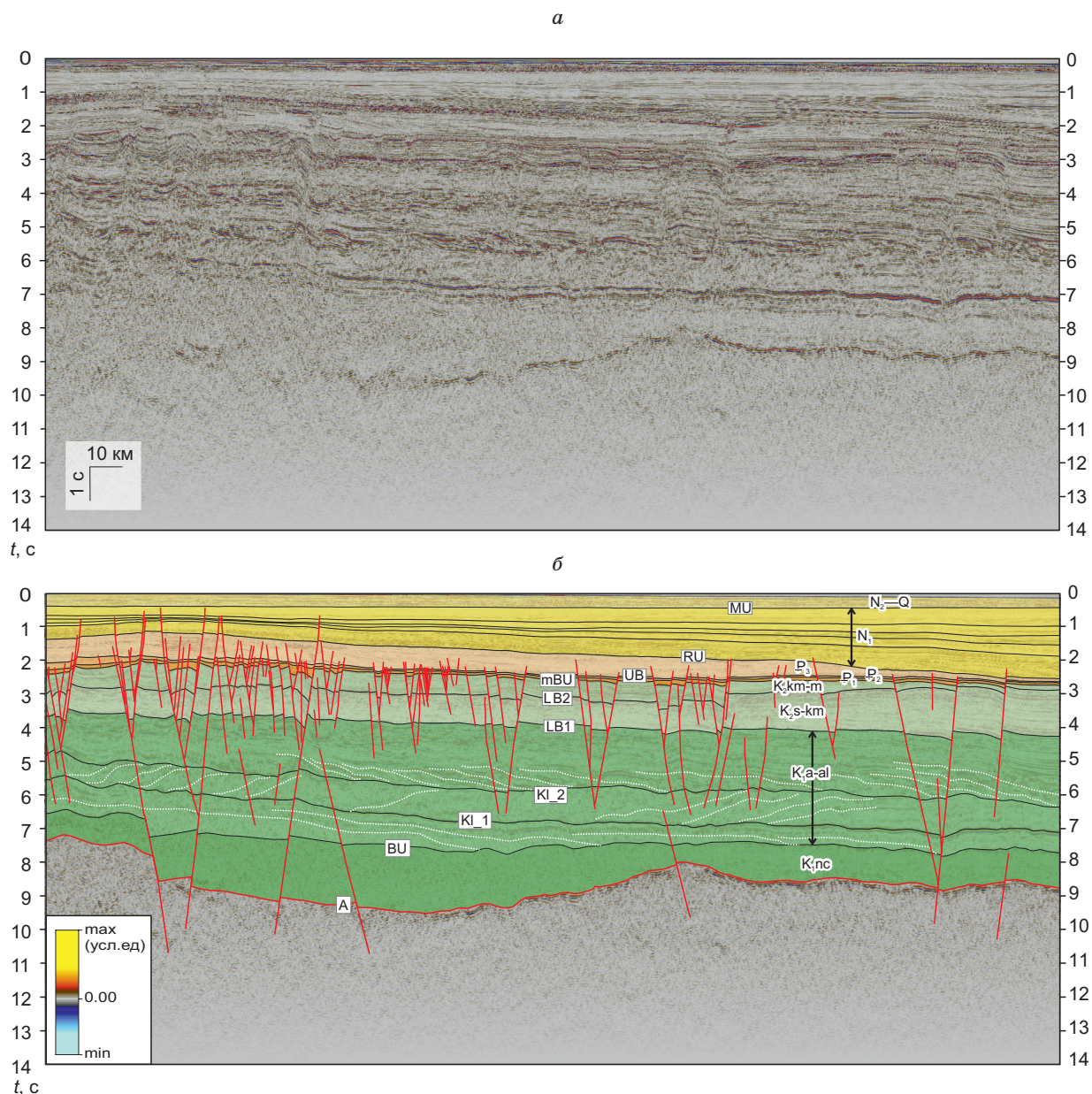


Рис. 7. Временной разрез по сейсмическому профилю С—С' (*a*) без интерпретации и (*b*) с интерпретацией.

кампан-маастрихтского ССПК представлена пакетами протяженных, средне- и высокочастотных, в основном высокоамплитудных отражений, свидетельствующих об акустической дифференциации разреза, обусловленной разнообразием литологического состава отложений, накопившихся в обстановке формирующейся континентальной окраины на фоне интенсивного поступления осадочного материала и тектонических деформаций. Для верхнемелового ССК характерно наличие малоамплитудных бескорневых нарушений — сбросов и взбросов, формирующих сложные системы разломов типа «веер» или «цветок» — структуры зон сдвигов и транспрессионных зон (см. рис. 7, 8).

В конце позднего мела Дремхедский и Северо-Чукотский бассейны были полностью компенсированы осадками. Глубина залегания верхнемелового комплекса в пределах Дремхедского бассейна составляет от 0.5 до 4.0 км, в западной части Северо-Чукотского от 1 до 5 км.

Отложения верхнемелового комплекса могут быть представлены континентальными и мелководно-морскими образованиями, невыдержанным составом и линзовидным характером неравномерно чередующихся песчаников, алевролитов и глин. В наиболее погруженной части Дремхедского бассейна возможно наличие НГМТ.

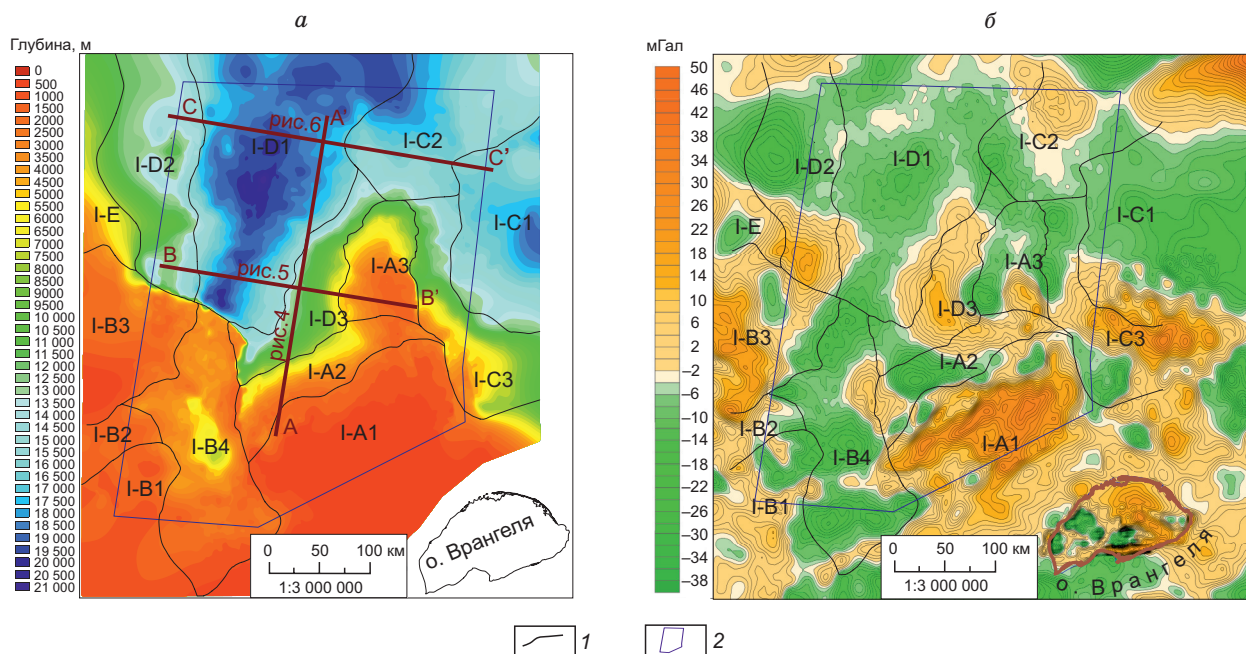


Рис. 8. а — структурная карта по подошве осадочного чехла в районе Северо-Врангелевского лицензионного участка и **б** — карта аномалии гравитационного поля (в редукции Буге 2.37 г/см³) [Заварзина и др., 2017] с границами основных тектонических элементов.

I-A — Врангелевско-Геральдская складчатая зона: I-A1 — Врангелевское поднятие, I-A2 — Южно-Шелагская терраса, I-A3 — Шелагское поднятие; I-B — Барановско-Певекская складчатая зона: I-B1 — Певекское поднятие, I-B2 — Северно-Певекская терраса, I-B3 — Барановское поднятие, I-B4 — Пегтымельский прогиб; I-C — Северо-Чукотский прогиб: I-C1 — Западная впадина, I-C2 — Восточно-Сибирская терраса, I-C3 — Западно-Мамонтовская терраса; I-D — Дремхедский прогиб: I-D1 — Дремхедский грабен, I-D2 — Западно-Дремхедская терраса, I-D3 — Восточно-Дремхедская терраса. 1 — границы тектонических элементов, 2 — Северо-Врангелевский лицензионный участок.

Кайнозойский ССК (mBU—дно моря) имеет четко выраженное клиноформное строение. В нем выделена серия клиноформных сейсмофаций, которая отличается сложным сигмовидно-косослоистым рисунком отражений, обусловленным быстрой сменой условий осадконакопления (см. рис. 6). Кайнозойский период характеризуется общим погружением бассейнов Восточной Арктики, связанным с раскрытием Евразийского бассейна и частой сменой обстановок осадконакопления. По характеру волновой картины внутри сейсмокомплекса выделены палеоценовый, эоценовый, олигоценый, миоценовый и плиоцен-четвертичный ССПК. Особенности сейсмической записи на временных разрезах указывают, что отложения подкомплексов и толщ формировались в циклически сменяющихся континентальных, прибрежных, мелководно-морских и морских условиях осадконакопления. Мощность кайнозойских отложений в пределах СВЛУ составляет от 0.5 до 5.0 км.

На основании этого в наиболее глубокой части Дремхедского бассейна в палеоценовом и эоценовом подкомплексах можно предположить присутствие глинистой нефтегазоматеринской толщи, формирование которой связано с глобальным потеплением, установленным повсеместно в пределах Восточной Арктики [Заварзина и др., 2017; Скарятин и др., 2021].

Наличие коллекторов можно прогнозировать в терригенных образованиях прибрежно-морской зоны фаций. Роль локальных покровов могут выполнять многочисленные глинистые толщ.

В то же время косвенными признаками наличия коллекторов в кайнозойской части разреза являются выявленные многочисленные аномалии сейсмической записи типа «яркое пятно». Выделенные аномалии приурочены к разломам, по которым могла происходить миграция углеводородов из более глубоких слоев апт-альбского, верхнемелового и нижней части кайнозойского осадочного чехла.

Основными тектоническими элементами в пределах СВЛУ являются Дремхедский прогиб и западная часть Северо-Чукотского прогиба, Новосибирско-Чукотская складчатая область, включающая Барановско-Певекскую и Врангелевско-Геральдскую складчатые зоны, которые выделяются как по мощности осадочного чехла и последовательности слагающих его сейсмогеологических комплексов, так и по аномалиям потенциальных полей [Заварзина и др., 2017].

Дремхедский прогиб расположен в центральной части СВЛУ и простирается в субмеридиональном направлении. До настоящего времени на месте прогиба выделялся Дремхедский рифт, который был

слабо изучен сейсморазведкой, и его положение в основном определялось по структуре аномального гравитационного поля и редкой сети региональных профилей МОГТ 2D. Предполагалось, что он представляет собой односторонний грабен, западный борт которого ограничен разломом Врангеля, а осадочный чехол образован отложениями верхнеюрско-барремского, апт-верхнемелового и кайнозойского комплексов общей мощностью более 11,5 км [Петровская, Савишкина, 2014].

Полученные новые геофизические данные позволили уточнить границы Дремхедского прогиба и выявить его обособленность от Северо-Чукотского. Структурами, разделяющими эти два прогиба, являются Шелагское поднятие и Восточно-Сибирская ступень. Ранее в работах предполагалось, что Дремхедский рифт является частью Северо-Чукотского прогиба, ответвляясь от него под прямым углом [Орлов и др., 2004; Петровская, Савишкина, 2014].

На западе Дремхедский прогиб отделен от Новосибирского прогиба террасой, выклинивающейся в северо-западном направлении. На севере он не замкнут, и его осадочное выполнение переходит в проградационный комплекс внешнего шельфа и континентального склона, раскрываясь в котловину Подводников. Восточный борт прогиба отделен от Северо-Чукотского Шелагским поднятием и Восточно-Сибирской ступенью (см. рис. 5). Юго-западный борт прогиба примыкает к Барановско-Певекской складчатой зоне по системе разломов северо-западного направления. Разломы представлены взбросами и взбрососдвигами с амплитудой от 1—3 до 6—9 км. На юго-востоке сочленение Дремхедского прогиба с Врангелевско-Геральдской складчатой зоной происходит по системе разломов (сбросов и сбрососдвигов) северного и северо-восточного направления (см. рис. 6). В целом Дремхедский прогиб представляет собой структуру, образовавшуюся в результате растяжения с правосдвиговой компонентой смещений.

Выполненная интерпретация позволила уточнить границы Дремхедского прогиба, а также зону его сочленения с окружающими складчатыми структурами и Северо-Чукотским прогибом. Уточненная геологическая модель Дремхедского прогиба подтверждена гравиметрическими данными (см. рис. 8) [Заварзина и др., 2017].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе сейсмостратиграфического и структурного анализов новыми сейсморазведочными данными установлено, что в пределах СВЛУ складчатое основание сформировано в результате позднекиммерийских деформаций различной интенсивности, а осадочный чехол сложен неокомским, апт-альбским, верхнемеловым и кайнозойским комплексами.

Обоснованием для этого предположения могут служить новые сейсморазведочные профили, расположенные вкрест простирания основных структур. На временных разрезах ниже поверхности, маркируемой отражающим горизонтом А (диахронное несогласие), в приподнятых блоках внутри складчатого фундамента прослеживаются яркие протяженные отражения, резко несогласные по отношению к подошве осадочного чехла и характеризующие внутреннюю слоистость складчатого основания (см. рис. 4, а). Предположительно, эти отражения сопоставимы с отложениями палеозоя—триаса, распространенными на о. Врангеля [Косько, Ушаков, 2003].

На профилях, расположенных в меридиональном направлении, отчетливо видно, что складчатый фундамент, выступающий на поверхность на о. Врангеля, в пределах Дремхедского прогиба плавно погружается на глубину от 5—8 до 14—20 км. Структура складчатого фундамента также хорошо опознается на Шелагском, Барановском и Врангелевском поднятиях, где на него резко несогласно налегают слои апт-альбских, верхнемеловых и кайнозойских отложений.

Таким образом, исходя из формационного анализа пород на прилегающей суше и о. Врангеля, очевидно, что складчатое основание на площади СВЛУ объединяет разновозрастные глубоко метаморфизованные образования позднего протерозоя и менее дислоцированные породы палеозоя—триаса и, возможно, средней юры, а возраст перекрывающих их чехольных комплексов определяется в зависимости от структурного положения и скользит в диапазоне от неокома в Дремхедском прогибе до неогена на поднятиях, примыкающих к о. Врангеля.

Сейсмические данные показывают, что заложение Дремхедского прогиба происходило на позднекиммерийском складчатом основании в результате процессов континентального рифтогенеза в раннемеловое время, а основное погружение бассейна произошло в апт-альбское время в непосредственной взаимосвязи со складчато-надвиговыми структурами Барановско-Певекской и Врангелевско-Геральдской складчатых зон.

Все крупные геологические события, проявившиеся в Восточно-Арктическом регионе, способствовали появлению новых источников сноса и активному перераспределению обломочного материала в Дремхедском бассейне.

Рифтогенное заложение Дремхедского бассейна, особенности фациальной изменчивости осадочных комплексов, когда условия морского, прибрежно-морского и дельтового осадконакопления сменя-

лись континентальными, а также интенсивная разломная тектоника создали условия для образования ловушек УВ различных типов. В пределах Северо-Врангелевского участка выявлены структурные, тектонически экранированные, литологические и стратиграфические ловушки.

С точки зрения перспектив нефтегазоносности можно выделить неокомский, апт-альбский, верхнемеловой и кайнозойский комплексы. Однако глубины залегания неокомского и апт-альбского комплексов от 5—8 до 20 км не позволяют рассматривать их с практической точки зрения. Возможные нефтематеринские толщи комплекса на определенных этапах могли генерировать углеводороды, но впоследствии подверглись процессам крекинга или миграции [Заварзина и др., 2018; Скарятин и др., 2021].

Полученные данные показали, что для оценки ресурсов УВ в пределах Северо-Врангелевского участка месторождения бассейна Северного склона Аляски не могут быть приняты в качестве аналогов. В Аляскинском бассейне в апт-сеноманское время также происходило накопление клиноформного комплекса формации Торок, сформировавшегося в результате сноса обломочного материала со стороны складчато-надвигового пояса (хр. Брукса). Однако глубины залегания кровли клиноформного комплекса здесь составляют до 1—2 км.

Сравнительный анализ обстановок осадконакопления и глубин залегания кровли клиноформного комплекса показывает, что эти отложения формировались в одно и то же время, но в разных геодинамических условиях. В апт-альбское время в пределах Дремхедского бассейна преобладали процессы растяжения, а на севере Аляски образование прогиба Колвилл происходило под воздействием надвиговых процессов в южном предгорье хр. Брукса (передовой прогиб).

В кайнозойское время в Дремхедском бассейне преобладали процессы растяжения и погружения, а в прогибе Колвилл завершилось накопление осадков, так как регион испытал несколько фаз аплифта [Sherwood et al., 1998; Sherwood et al., 2002; Craddock, Houseknecht, 2016].

Исходя из истории тектонического развития и косвенных признаков наличия УВ на временных разрезах, можно предположить, что отложения кайнозойской части разреза в пределах Северо-Врангелевского участка могут обладать высоким нефтегазогенерационным потенциалом. В качестве аналога для оценки ресурсов УВ кайнозойского комплекса хорошо согласуется клиноформный комплекс формаций Нанушук (Nanushuk) и Торок (Torok), где в 2015—2017 гг. в формации Торок (нижнебрукский комплекс) открыто нефтяное месторождение Смит-Бэй (Smith Bay), а в отложениях группы Нанушук — нефтяные месторождения Пикка (Pikka) и Уиллоу (Willow) [Скарятин и др., 2021].

ВЫВОДЫ

Появление новых данных в 2018—2019 гг. в пределах Северо-Врангелевского участка недр придает несомненную актуальность некоторым противоречивым вопросам сейсмостратиграфии и истории развития Восточно-Арктического региона.

Приведенные данные показывают, что в непосредственной близости от о. Врангеля складчатые комплексы палеозоя—триаса продолжают на шельфе восточной части Восточно-Сибирского моря в составе складчатого фундамента. Возможно, проявления позднекеммерийского орогенеза проходили только в зоне о. Врангеля и прилегающей полосе Северо-Врангелевского участка.

Подтверждено субмеридиональное простираие Дремхедского прогиба, заложение которого началось в позднеюрско(?)—неокомское время и завершилось к позднему мелу.

В пределах Дремхедского прогиба выявлено клиноформное строение апт-альбского и кайнозойского комплексов. Мощность апт-альбского комплекса и строение клиноформных тел свидетельствуют об относительно быстром прогибании бассейна и лавинном темпе седиментации.

Исходя из современных глубин залегания, целевыми комплексами для изучения являются верхнемеловой и кайнозойский. Оценка перспектив нефтегазоносности кайнозойского клиноформного комплекса, в частности путем проведения численного бассейнового моделирования, должна основываться на результатах сейсмофациального и структурного анализа. Учитывая сложную модель строения комплекса, до бурения поисковой скважины необходимо выполнить детальное изучение локальных объектов сейсморазведочными работами МОГТ 3D.

ЛИТЕРАТУРА

Виноградов В.А., Гусев Е.А., Рекант П.В., Пяткова М.Н. Особенности формирования осадочно-геохимического Таймырско-Аляскинской области Арктики (с позиции структурных связей в системе шельф—океан) // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2016, т. 11, № 1, с. 1—26.

Дараган-Сушова Л.А., Соболев Н.Н., Петров Е.О., Гринько Л.Р., Петровская Н.А., Дараган-Сушов Ю.И. К обоснованию стратиграфической привязки опорных сейсмических горизонтов на Восточно-Арктическом шельфе и в области Центрально-Арктических поднятий // Региональная геология и металлогения, 2014, № 58, с. 5—21.

Заварзина Г.А., Мурзин Р.Р., Захарова О.А. Результаты комплексного анализа аэрогравимагнитных и сейсморазведочных данных восточной части Восточно-Сибирского моря // *Геофизика*, 2017, № 4, с. 69—74.

Заварзина Г.А., Шапабаева Д.С., Космынин В.А., Захарова О.А. Моделирование углеводородных систем как инструмент для комплексной оценки перспектив нефтегазоносности и геологических рисков на примере арктических шельфовых проектов // *Охрана и разведка недр*, 2018, № 8, с. 21—28.

Заварзина Г.А., Шапабаева Д.С., Захарова О.А. Анализ обстановок осадконакопления бассейнов Восточной Арктики с целью оценки перспектив нефтегазоносности // *«Геомодель-2019»*, Геленджик, 2019.

Косько М.К., Ушаков В.И. Остров Врангеля: геологическое строение, минералогия, геоэкология. СПб, ВНИИОкеангеология, 2003, 137 с.

Кузьмичев А.Б., Соловьёв А.В., Гоникберг В.Е., Шапиро М.Н., Замжицкий О.В. Синколлизонные мезозойские терригенные отложения о. Большой Ляховский (Новосибирские острова) // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 2006, т. 14, № 1, с. 33—53.

Лобковский Л.И., Гарагаш И.А., Кононов М.В., Вержбицкий В.Е., Котелкин В.Д. Тектоника деформируемых литосферных плит и геодинамическая эволюция Арктического региона в мезозое—кайнозое // *Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии*. М., ГЕОС, 2010, № 2, с. 8—40.

Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Добрецов Н.А., Верниковский В.А., Соколов С.Д., Шпилов Э.В. Базовая модель тектонического развития Арктики как основа для подготовки обновленной заявки России в Комиссию ООН на установление внешней границы континентального шельфа // *Арктика: экология и экономика*, 2012, №2 (6), с. 4—19.

Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Соколов С.Д., Шпилов Э.В. Геодинамическая модель развития Арктического бассейна и примыкающих территорий для мезозоя и кайнозоя и внешняя граница континентального шельфа России // *Геотектоника*, 2013, № 1, с. 3—35.

Луцицкая М.В., Моисеев А.В., Соколов С.Д., Тучкова М.И., Сергеев С.А., О’Салливан П.Б., Вержбицкий В.Е., Малышев Н.А. Окраинно-континентальные и внутриплитные позднепротерозойские граниты и риолиты о. Врангеля (Арктика) // *Геотектоника*, 2017, № 1, с. 19—43.

Моисеев А.В., Соколов С.Д., Тучкова М.И., Вержбицкий В.Е., Малышев Н.А. Этапы структурной эволюции осадочного чехла о. Врангеля, Восточная Арктика // *Геотектоника*, 2018, № 5, с. 22—38.

Никишин А.М., Старцева К.Ф., Вержбицкий В.Е., Клутинг С., Малышев Н.А., Петров Е.И., Посаментьер Х., Фрейман С.И., Линева М.Д., Жуков Н.Н. Сейсмостратиграфия и этапы геологической истории осадочных бассейнов Восточно-Сибирского и Чукотского морей и сопряженной части Американо-Сибирского бассейна // *Геотектоника*, 2019, № 6, с. 3—26.

Орлов В.П., Грамберг И.С., Красный Л.И., Кривцов А.И., Лаверов И.И., Петров О.В., Сурков В.С., Щеглов А.Д. Геология и полезные ископаемые России. Т. 5 // *Арктические и дальневосточные моря*. Кн. 1. Арктические моря. СПб, ВСЕГЕИ, 2004, с. 341—374.

Петровская Н.А., Савишкина М.А. Сопоставление сейсмокомплексов и основных несогласий в осадочном чехле шельфа Восточной Арктики // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, 2014, т. 9, № 3, с. 1—26.

Рекант П.В., Петров О.В., Пищепенко Д.В. Формирование складчато-надвиговой структуры южной части шельфа Восточно-Сибирского моря по результатам структурного анализа сейсмических материалов // *Региональная геология*, 2020, с. 35—59.

Скарятин М.В., Ставицкая В.Н., Мазаева И.В., Зайцева С.А., Баталова А.А., Моисеева Р.Х., Винниковская Е.В., Булгакова Е.А., Малышев Н.А., Вержбицкий В.Е., Обметко В.В., Бородулин А.А. Применение результатов анализа траектории кромки клиноформ в пространстве для прогноза перспектив нефтегазоносности осадочного чехла Северо-Чукотского мегапрогиба // *Нефтегазовое хозяйство*, 2021, № 2, с. 40—45.

Соколов С.Д., Тучкова М.И., Моисеев А.В., Вержбицкий В.Е., Малышев Н.А., Гущина М.Ю. Тектоническая зональность острова Врангеля (Арктика) // *Геотектоника*, 2017, № 1, с. 3—18.

Хаин В.Е., Филатова Н.И., Полякова И.Д. Тектоника, геодинамика и перспективы нефтегазоносности Восточно-Арктических морей и их континентального обрамления. М., Наука, 2009, 227 с.

Craddock, W.H., Houseknecht, D.W. Cretaceous–Cenozoic burial and exhumation history of the Chukchi shelf, offshore Arctic Alaska // *AAPG Bull.*, 2016, 100 (1), p. 63—100.

Drachev S.S. Tectonic setting, structure and petroleum geology of the Siberian Arctic offshore sedimentary basins // *Arctic Petroleum Geology* / Eds. A.M. Spencer, A.F. Embry, D.L. Gautier, A.V. Stoupakova, K. Sørensen. *Geol. Soc. London Mem.*, 2011, Ch. 25.

Kostyleva V., Shchepetova E., Kotelnikov A. Upper Cretaceous rhyolitic ash beds from the Novaya Sibir Island (New Siberian Islands). 2019, <https://doi.org/10.1080/11035897.2019.1641548>.

Sherwood K.W., Craig J.D., Cooke L.W., Lothamer R.T., Johnson P.P., Zerwick S.A., Scherr J., Herman B., McLean D., Haley S., Larson J., Parker J., Newman R., Comer C. Drew, Banet S.M., Hurlbert S.B., Sloan P., Martin G., Horowitz W.L. Undiscovered oil and gas resources, Alaska Federal Offshore, as of January 1995. US Department of the Interior, Minerals Management Service. Alaska OCS Monograph, MMS 98-0054, 1998, 531 p.

Sherwood K.W., Johnson P.P., Craig J.D., Zerwick S.A., Lothamer R.T., Thurston D.K., Hurlbert S.B. Structure and stratigraphy of the Hanna Trough, U.S Chukchi Shelf, Alaska // Tectonic Evolution of the Bering Shelf-Chukchi Sea-Arctic Margin and Adjacent Landmasses / Eds. E.L. Miller, A. Grantz, S.L. Klemperer. GSA Spec. Pap., 2002, v. 360, p. 39—66.

Sherwood K.W., Craig J.D., Cooke L.W., Lothamer R.T., Johnson P.P. Regional correlations for wells on U.S. Chukchi Shelf and Western Arctic Alaska. MMS, 2006.