

Л. А. ДАРАГАН-СУЩОВА, В. Н. ЗИНЧЕНКО (ВСЕГЕИ),
Ю. И. ДАРАГАН-СУЩОВ (ВНИИОкеангеология),
И. Н. САВЕЛЬЕВ (ВСЕГЕИ)

О времени главного погружения до океанических глубин и масштабах разновозрастного рифтогенеза в Арктическом бассейне по результатам интерпретации сейсмических данных

В статье даны ответы на два актуальных вопроса: время главного погружения до океанических глубин, возраст и масштабы рифтогенеза. Доказано, что Северный Ледовитый океан образовался одновременно по всему Арктическому бассейну, независимо от знака современных структур. Погружение началось в олигоцене и резко усилилось со среднего миоцена. Установлена разноэтапность погружения бассейнов до океанических глубин, определившая морфологию современных склонов. Показано, что система горстов и грабенов, наблюдаемая по всему Арктическому бассейну, возникла на орогенной стадии развития поднятий, разбитых в результате горообразования на межгорные и предгорные впадины и прогибы. Установлен огромный разрыв во времени между опусканием до океанических глубин (средний миоцен) и формированием горсто-грабеновой структуры. Масштабы грабенов очень скромные и не коррелируются с известными рифтами.

Ключевые слова: Арктический бассейн, Северный Ледовитый океан, интерпретация сейсмических данных, погружение до океанических глубин, возраст и масштабы рифтогенеза, горст, грабен, межгорные и предгорные впадины и прогибы.

L. A. DARAGAN-SUSHCHOVA, V. N. ZINCHENKO (VSEGEI),
YU. I. DARAGAN-SUSHCHOV (VNIIOkeangeologia),
I. N. SAVEL'EV (VSEGEI)

The time of the main submersion to the oceanic depths and the scale of different age rifting in the Arctic Basin based on the results of seismic data interpretation

The article answers two topical questions: the time of the main submergence to the ocean depths, the age and extent of rifting. It is shown that the Arctic Ocean was formed simultaneously across the entire Arctic Basin, regardless of the sign of Recent structures. The submergence began in the Oligocene and increased sharply from the Middle Miocene. Different stages of basin submergence to oceanic depths, which determined morphology of modern slopes, have been identified. It is shown that the horst and graben system recorded all over the Arctic Basin, occurred at the orogenic stage of the growth of elevations, broken in the course of orogenesis into intermontane and piedmont depressions and troughs. A huge time gap between the submergence to the ocean depths (Middle Miocene) and the formation of the horst and graben structure has been established. Grabens' dimensions are very modest and do not correlate with known rifts.

Keywords: Arctic Basin, Arctic Ocean, seismic data interpretation, submergence to ocean depths, age and extent of rifting, horst, graben, intermontane and piedmont depressions and troughs.

Для цитирования: Дараган-Сушова Л. А. О времени главного погружения до океанических глубин и масштабах разновозрастного рифтогенеза в Арктическом бассейне по результатам интерпретации сейсмических данных / Л. А. Дараган-Сушова, В. Н. Зинченко, Ю. И. Дараган-Сушов, И. Н. Савельев // Региональная геология и металлогения. — 2019. — № 80. — С. 5–20.

Введение. Современный Арктический бассейн занимает северную полярную область Земли и представлен глубоководной впадиной Северного Ледовитого океана (СЛО) и сопредельными шельфами Евразии и Северо-Американского континента [1]. СЛО является самым молодым океаном планеты с многочисленными участками с континентальной или не полностью океанизированной коры. В отличие от зрелых океанов для него характерны наименьшие площадные

размеры, средние глубины и наиболее обширные континентальные шельфы, осадочные бассейны которых формировались на доокеаническом этапе тектонического развития [2] и имеют мощный осадочный чехол. По батиметрическим и геофизическим данным в глубоководной части СЛО выделяют Евразийский и Амеразийский бассейны. Морфоструктура Евразийского бассейна наиболее простая: две глубоководные впадины Нансена и Амундсена и разделяющий их срединный

хр. Гаккеля. Амеразийский бассейн представлен обширной глубоководной Канадской котловиной с морем Бофорта, Чукотским плато и хр. Нордуинд и Центрально-Арктическим поясом поднятий и впадин, который состоит из хребтов Ломоносова и Альфа-Менделеева и погруженных на разные глубины впадин Подводников и Макарова. В Амеразийском бассейне значительно большее разнообразие структур, слагающих бассейн, отсутствуют морфологически выраженные срединно-океанические хребты, есть затруднения с выделением и идентификацией не явно выраженных линейных магнитных аномалий.

Общеизвестно повышенное внимание международного сообщества к Арктическому бассейну, которое обусловлено его возросшим политико-экономическим значением. Помимо проблем с обоснованием внешней границы континентального шельфа, бассейн является уникальным объектом по причине своей молодости для реконструкции истории геологического развития и разработки геодинамических моделей зарождающегося океана. В связи с практическими задачами по освоению этого бассейна в последние десятилетия значительно возросло количество и качество сейсмических работ, дополненное драгированием донного обломочного материала и глубоководным бурением. Поскольку Арктический бассейн почти недоступен для непосредственного геологического наблюдения, сейсмическое профилирование — главнейший источник фактического материала для расшифровки строения осадочного чехла и реконструкции последовательности событий в регионе в динамическом аспекте с историко-геологических позиций. Применяя приемы сейсмостратиграфии, по отражающим горизонтам и волновым полям удается выявить не только структуру осадочного чехла, но и прогнозировать распределение сейсмофаций в разрезе и проследить их по латерали на большие расстояния. Цель статьи — демонстрация результатов интерпретации сейсмических материалов и их вклада в решение некоторых наиболее проблемных вопросов развития региона. В статье рассмотрены два из них: о времени главного погружения дна Арктического бассейна до современных глубин, а также о возрасте и масштабах рифтогенеза.

Согласно наиболее часто используемой в последнее время плейт-тектонической концепции [15; 17; 21], время заложения глубоководных бассейнов в пределах СЛО различно: готерив-барремское для Канадской котловины, верхнемеловое — котловины Макарова и эоценовое — спредингового — Евразийского бассейна. Считается, что главной причиной формирования Амеразийского бассейна СЛО явился рифтогенез, который начался в Арктике с излияния аптских плато-базальтовых толщ поднятия Менделеева.

Фактический материал и методика исследований. Изучение базируется на анализе волновых полей каркаса взаимоувязанных сейсмических профилей различного разрешения, охватывающих

шельф, часть акватории в области Центрально-Арктических поднятий, а также сопряженных глубоководных впадин и котловин. Комплекс взаимосвязанных профилей МОВ ОГТ состоял из 77 профилей (30 026 пог. км) и данных по 201 зонду. Сейсмические разрезы на шельфах в основном получены по самым передовым технологиям с длинами приемного устройства около 8 км. В глубоководной части Арктического бассейна, где представлялась возможность по метеоусловиям и ледовой обстановке, часть профилей получена с длиной косы 4,5 км, остальные профили — с косой 0,6 км. Все профили прошли стандартный современный граф обработки. Сейсмические работы МОВ ОГТ, используемые в исследовании, проводились разными организациями, но в основном МАГЭ (Мурманск), ДМНГ (Южно-Сахалинск), Севморгео, ГНИНГИ (Санкт-Петербург).

Стратификация осадочного чехла глубоководной части СЛО и шельфов основана на характеристике волновых полей (динамических и кинематических) и прослеживании отражающих горизонтов (ОГ) по латерали. Для возрастной идентификации ОГ и сейсмокомплексов привлекались результаты глубоководного бурения в приполюсной части хр. Ломоносова (скв. АСЕХ-302) [20], глубокие скважины, пробуренные на Аляскинском шельфе в Чукотском море [16], и геологические наблюдения на арктических островах и материке. Дополнительной характеристикой, учитываемой при корреляции квазисинхронных сейсмических комплексов (КССК), является распределение пластовых скоростей по сейсмическому разрезу, которые не могут быть атрибутами собственно стратиграфии, хотя несут важную информацию о физических свойствах исследуемой среды. Интерпретация сейсмических данных МОВ ОГТ осуществлялась в соответствии с принципами сейсмостратиграфии [12]. Этот научный метод получил мировое признание, продолжая активно развиваться при исследовании закрытых территорий и акваторий. Принимая во внимание практически полное отсутствие скважин в глубоководной части СЛО, при выделении и прослеживании ОГ и КССК также применялись главные принципы классической стратиграфии, гомотаксальность признаков и их хронологическая взаимозаменяемость, позволяющие коррелировать их одинаковую последовательность (независимо от их природы) в различных разрезах и, следовательно, считать слои с одинаковыми признаками относительно одновозрастными, или квазисинхронными [10]. Подходы к корреляции ОГ Арктического бассейна и их стратиграфической идентификации эволюционно изложены ранее [5–8; 16].

Большое количество региональных сейсмических профилей позволило построить серию структурных карт и карт мощностей. Для структурных карт использовалась не единая скоростная зависимость [8] при пересчете временных в глубинные grids, а детальные расширенные

скоростные grids по каждому ОГ и полигоны разломов. Скоростные grids получены с учетом всех зондов МПВ (201 шт.) в глубоководной части СЛО и 108 псевдоскважин на шельфах. Полигоны разломов представляют собой линии пересечения той или иной структурной поверхности с плоскостями разломных нарушений. Использование полигонов разломов позволяет наглядно отображать амплитуды тектонических смещений по вертикали на структурных картах. Все операции выполнялись на базе интерпретационного пакета. Карты мощностей построены на основе структурных карт по основным опорным горизонтам. С помощью ПО Spatial Analyst из поверхности нижележащего горизонта вычиталась поверхность вышележащего, в результате чего получалась поверхность, иллюстрирующая изменения мощности комплекса, заключенного между ними. К результирующим поверхностям была применена спецификация в ПО ArcMap с использованием стандартной палитры. В дополнение с помощью инструмента Contour ПО Spatial Analyst был создан векторный слой изопакит сечением от 200 м до 1 км в зависимости от максимальной мощности комплекса.

По ряду композитных региональных сейсмических профилей, пересекающих основные тектонические структуры прироссийской части Арктического бассейна, были построены и проанализированы палеотектонические разрезы. Они позволяют проследить динамику и время формирования осадочных бассейнов и поднятий и в значительной мере необходимы для обоснования геодинамических моделей. Для сейсмофациального анализа также выбраны профили, пересекающие основные тектонические структуры в регионе. В первую очередь были задействованы профили, отчетливо фиксирующие косослоистые фации в разных частях разреза (от мела до неогена) и позволяющие увязать их между собой в плане.

Результаты исследований и их обсуждение. *Время главного погружения до океанических глубин.* Определение времени главного погружения проиллюстрируем двумя субширотными профилями, пересекающими основные структуры как в Амеразийском, так и Евразийском бассейнах (рис. 1, 2), и картой мощности верхнего КССК (рис. 3).

Профиль Arc2012_03 (рис. 1, в) начинается от седловины Кучерова на западе и заканчивается на Чукотском плато на востоке, захватывая поднятие Менделеева и бассейн Толля. Акустический фундамент вдоль профиля повсеместно элсмирский (как и под Северо-Чукотским прогибом), разбит многочисленными нарушениями на блоки, пластовые скорости ($V_{пл}$ от 3,8 до 4,5 км/с) указывают на слабоскладчатый неметаморфизованный фундамент [6]. Сейсмофациальный анализ волновых полей КССК осадочного чехла показал, что до апта (до ОГ ВU — нижебрукское несогласие) преобладали терригенные фации,

сформированные в пределах морских бассейнов типа эпиконтинентального разноглубоководного шельфа. Стабильная и схожая волновая картина этих толщ в пределах седловины Кучерова, бассейна Толля и в отдельных грабенах Чукотского плато свидетельствует о единстве бассейна, в котором они формировались, и близких фациальных характеристиках.

В послепетское время (КССК ВU—pCU) произошел первый этап масштабного опускания Арктического бассейна до глубин 1000–1200 м и более, который фиксируется на разрезе по профилю Arc2012_01, пересекающему профиль Arc2012_03, широким развитием клиноформных образований в южной части Амеразийского бассейна (рис. 1, б). На рассматриваемом профиле (рис. 1, а) он выражен сейсмофациями умеренно погруженных впадин эпипелагиали (секвенции K_1-4 — K_2-2), удаленных от края шельфа. При этом со временем площадь глубоководья в пределах Северо-Чукотского бассейна сокращалась, а бровка шельфа постепенно смещалась к северу и северо-западу (рис. 1, б), что обуславливает появление более мелководных отложений на профиле: верхнемеловые сейсмофации секвенций K_2-3 и K_2-4 . В начальные фазы проградации (аптский век) внешний край шельфа находился приблизительно там же, где и сейчас, а к концу позднемеловой эпохи он располагался в районе юго-восточного склона седловины Кучерова (рис. 1, б); величина проградации в северо-западном направлении составила порядка 500 км.

В палеоцене и эоцене (КССК pCU—UB) Арктический бассейн находился в режиме относительной стабилизации и был представлен шельфовыми равнинами с глубиной моря до 300–400 м в пределах современных шельфовых пространств и Северо-Чукотского прогиба, а на остальной территории — погруженным морским дном котловин с глубинами моря до 1000 м и слабовыраженными поднятиями с глубинами до нескольких сотен метров. Осадки в этот промежуток времени лишь частично компенсировали относительно глубоководные акватории, унаследованные от мелового времени. Край внешнего шельфа находился тогда приблизительно там же, где и в конце мелового времени.

В олигоцене — раннем миоцене (КССК UB—RU) фиксируется новый этап погружения Арктического бассейна, который привел к резкому перемещению бровки шельфа к юго-востоку (рис. 1, б), где он занял примерно то же положение, что и в начале аптского века. Началось формирование нового проградационного комплекса отложений (рис. 1, б), который на пр. Arc2012_03 представлен только гемипелагическими сейсмофациями открытой морской акватории глубиной не менее 1000 м (рис. 1, а). В этот же отрезок времени появляются сейсмофации клиноформного напластования и в южной периферии (центриклинали) Евразийского бассейна (рис. 4, 5).



Рис. 1. Сейсмofациальный разрез по профилю Arg2012_03 (a), часть сейсмofациального профиля Arg2012_01 (б)

1–4 – сейсмощаии: 1 – мелкого моря и прибрежных равнин (пограничная область суша/море), 2 – нерасчлененного шельфа (глубина моря 0–200 м), 3 – глубокого шельфа (глубина моря > 200 м), 4 – склона (первично наклонные клиноформные образования, оползневые образования); 5 – подводные конусы выноса во впадинах и котловинах; 6 – сейсмощаии слабопогруженных впадин и котловин, сейсмощаии краевых частей впадин и котловин (глубина моря от сотен метров до 1 км); 7 – сейсмощаии умеренно погруженных впадин и котловин (глубины моря до 1,5 км); 8 – сейсмощаии глубоководных впадин и котловин (глубины моря более 1,5 км); 9 – вулканические образования (преимущественно базальты), межпластовые интрузивные тела; 10 – опорные сейсмические горизонты и их индексы; 11 – границы между сейсмощаиями; 12 – фациальные переходы внутри сейсмощаии; 13 – индексы клиноформных комплексов; 14 – линия пересечения профилей; 15 – линии профилей (а) участки профилей, представленных на врезках (б)

Последнее масштабное погружение Арктического бассейна устанавливается по наличию хорошо выраженных клиноформных образований (рис. 1, б) в сейсмокомплексе RU—dno (среднемиоценовое — четвертичное время). На пр. Arctica_2012_03 (рис. 1, в) данному этапу отвечают сейсмofации глубокопогруженных впадин и котловин, а также их краевых частей, представленные, видимо, преимущественно глинистыми пелагическими осадками, аналогичными тем, что вскрыты скважинами АСЕХ. Судя по конфигурации клиноформ, наиболее значимое погружение связано с самыми молодыми фазами формирования КССК RU—dno, которое охватило обширные территории и Амеразийского, и Евразийского бассейнов. Современные глубины и структуры этих бассейнов оформились именно в этот короткий промежуток времени.

Профиль ARCTICA_2011_28-065 (рис. 2, а) проходит севернее предыдущего от хр. Гаккеля и котловины Амундсена на западе до бассейна Подводников (включительно) на востоке, пересекая хр. Ломоносова, Восточно-Ломоносовский бассейн и отрог (поднятие) Геофизиков. Акустический фундамент в пределах профиля разновозрастный [8]. Рельеф фундамента в восточной части котловины Амундсена, на хр. Ломоносова, и западном борту Восточно-Ломоносовского бассейна резко расчленен, а в восточной половине Восточно-Ломоносовского бассейна он ровный, спокойный и на отдельных участках динамически выразителен. Такая нестабильность динамической записи указывает на относительно молодой возраст фундамента А (предположительно, доаптский). С середины котловины Амундсена на запад до хр. Гаккеля сильно расчлененный блоковый фундамент A_0 прорывает практически все комплексы осадочного чехла (об этом свидетельствует характерная динамика ОГ этих комплексов — все они задираются по разломам вверх). Возраст его прогнозируется от среднемиоценового до плиоцена, возможно, плейстоцена. К востоку от поднятия Геофизиков волновое поле поверхности акустического фундамента (Af) представлено многофазной (3—4 фазы ОГ) границей, гладкой, стабильной, нарушенной вблизи разломных зон (выступов фундамента). $V_{пл}$ колеблется от 4,4 до 5,9 км/с, понижаясь в районе разломных зон. Динамические особенности волнового поля характерны для устоявшегося фундамента, более древнего, чем в Восточно-Ломоносовском бассейне. Судя по стратиграфическому объему чехла и особенностями волновых полей, это элсмирский (франклинский комплекс) складчатый акустический фундамент.

В котловине Амундсена в нижней до кайнозойской части разреза осадочного чехла наблюдаются 2 КССК с интенсивной слоистостью и в небольших мощностях (до 0,6—0,7 км). $V_{пл}$ меняются от 3,1 до 3,9 км/с. Это может говорить об условиях глубокого шельфа. К западу от отрога Геофизиков в осадочном чехле наблюдаются также два комплекса с неструктурированной

формой записи. Такая запись характерна либо для акустического фундамента, либо для толщ, накапливавшихся в нестабильных условиях седиментации, например, моласс, сформированных при интенсивном разрушении соседних блоков. Разделяющие эти комплексы ОГ указывают на наличие нижней и верхней молассы, что особенно выражено в Восточно-Ломоносовском бассейне, где оба комплекса присутствуют в значительных объемах. К востоку от отрога Геофизиков (включая само поднятие) в докайнозойской части разреза чехла мы наблюдаем большее число КССК (до 5) с более протяженными интенсивными, динамически выраженными отражениями с небольшими мощностями. Это свидетельствует о более раннем развитии осадочного бассейна и спокойных морских условиях осадконакопления. С нижнемеловых аптских отложений по верхний мел формируются сейсмofации умеренно погруженных впадин и котловин (глубины моря до 1,5 км). В послеаптское время (КССК BU—pCU) по композитному профилю AR1401—ES10z22m (рис. 2, б), пересекающему профиль ARCTICA_2011_28-065, наглядно представлен первый этап масштабного опускания Арктического бассейна до глубин 1000—1200 м и более, который фиксируется на разрезе по профилю широким развитием клиноформных образований и континентальным палеосклоном в районе ПК 550.

Верхняя кайнозойская (Kz) часть разреза от ОГ pCU до современных отложений (4 КССК) присутствует практически повсеместно. Варьируют мощности, в меньшей мере скорости, но стратиграфический объем почти не меняется. Мощности и пластовые скорости, как правило, уменьшаются на поднятиях (иногда до полного исчезновения КССК) и резко увеличиваются в прогибах, особенно в котловине Амундсена. На профиле фиксируется, что главное погружение в Евразийском и Амеразийском бассейнах произошло после формирования горизонта RU, т. е. со среднего миоцена.

Таким образом, по результатам сейсмofациального анализа образование современного шельфа, континентального склона и больших, в том числе абиссальных, глубин в Евразийском и Амеразийском бассейнах началось в олигоцене и резко усилилось со среднего миоцена, с ОГ RU. Только с этого времени оба бассейна погрузились до современных глубин. Это заключение полностью соответствует результатам бурения на приполюсной части хр. Ломоносова [20], что свидетельствует о совсем недавнем становлении нынешнего облика СЛО — около 13 млн лет назад. До этого времени на всем исследованном пространстве существовало разнотемноководное море или шельф. Миоценовый возраст главного погружения доказывает соответствие палеоструктурного плана миоценовых и плиоцен-четвертичных толщ Лаптевоморской континентальной окраины ее современному структурному плану [3].

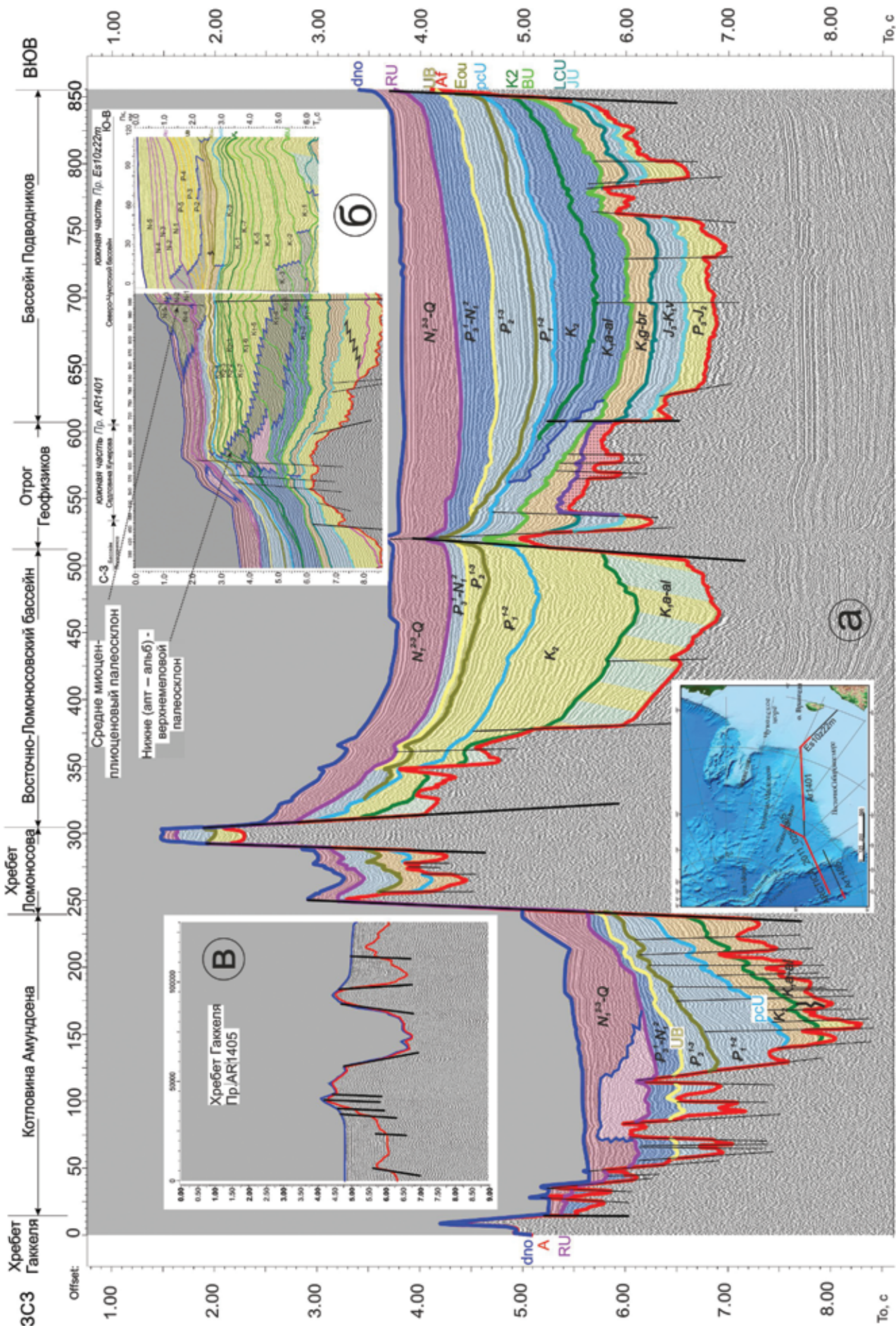




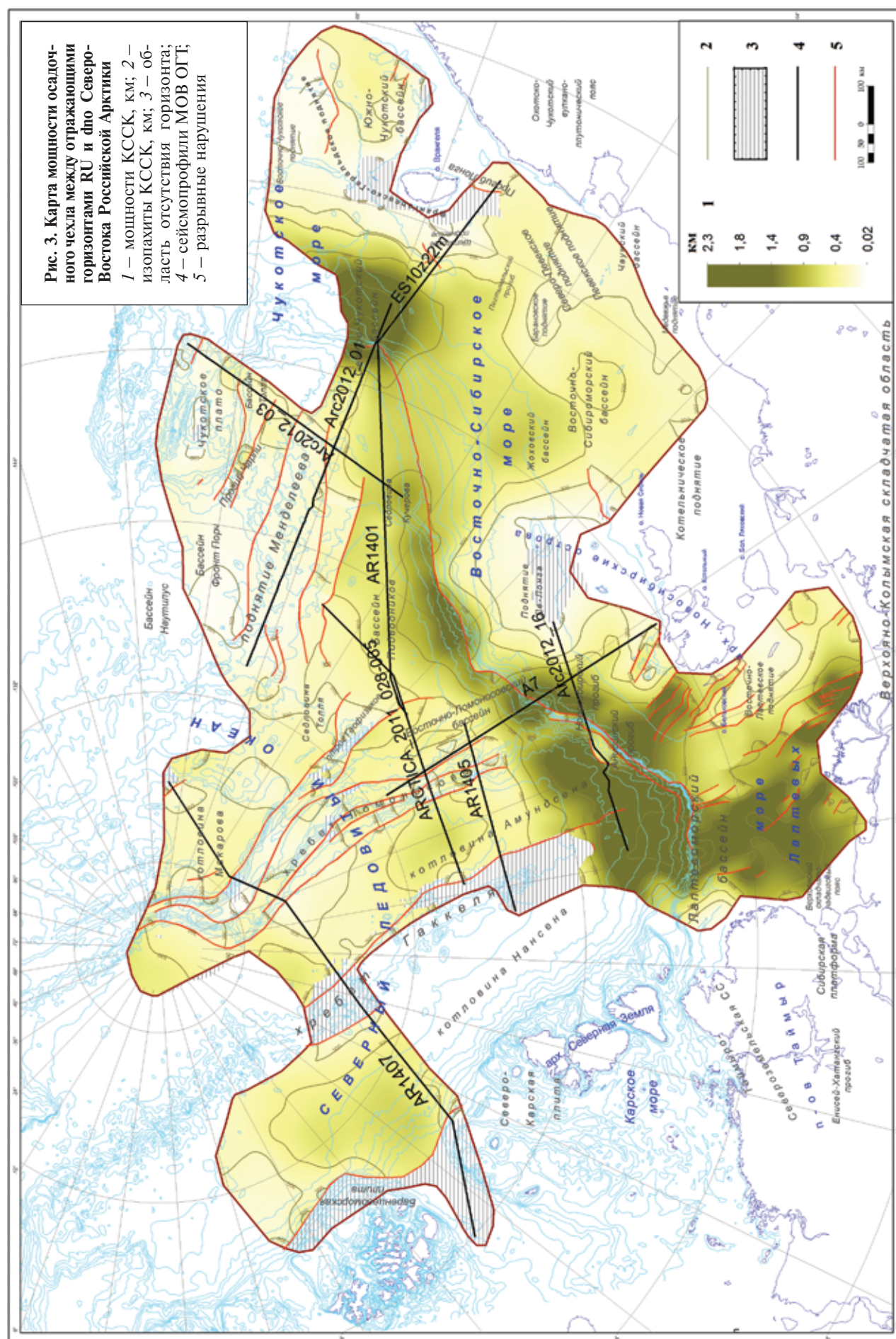
Рис. 2. Сейсмифациальный разрез по профилю ARCTICA_2011_028-065 (а), часть композитного сейсмифациального профиля AR1401 – Es10z22m (б); сейсмический разрез по профилю AR1405 в районе хр. Гаккеля (в)

1–4 – сейсмифации: 1 – мелкого моря и прибрежных равнин (пограничная область суша/море), 2 – нерасчлененного шельфа (глубина моря 0–200 м), 3 – глубокого шельфа (глубина моря > 200 м), 4 – склона (первично наклонные клиноформные образования, оползневые образования); 5 – подводные конусы выноса во впадинах и котловинах; 6 – сейсмифации слабонагруженных впадин и котловин, краевых частей впадин и котловин (глубина моря от сотен метров до 1 км); 7 – сейсмифации умеренно погруженных впадин и котловин (глубины моря до 1,5 км); 8 – сейсмифации глубокопогруженных впадин и котловин (глубины моря более 1,5 км); 9 – вулканические образования (преимущественно базальты), межпластовые интрузивные тела; 10 – опорные сейсмические горизонты и их индексы; 11 – границы между сейсмифациями; 12 – фациальные переходы внутри сейсмифаций; 13 – индексы клиноформных комплексов; 14 – линия пересечения профилей; 15 – линии профилей (а) и участки профилей, представленных на врезках (б)

Характерно, что процесс погружения был различен для разных частей современной акватории. Для Евразийского бассейна, хр. Ломоносова и Восточно-Ломоносовского бассейна [8] происходило одноэтапное постепенное погружение бассейна от шельфовых условий к постепенному углублению моря до современных абиссальных глубин. На поднятии Менделеева и в бассейне Толля погружение было двухэтапным с обмелением бассейна с верхнего мела до олигоцена. Логично предположить схожую динамику погружения в грабенах Чукотского плато, хотя ввиду их малого размера и ограниченного количества сейсмических данных это не очевидно. Для Северо-Чукотского прогиба и бассейна Подводников погружение трехэтапное с обмелением бассейна в готерив-барремское и палеоцен-эоценовое время. При этом склон мелового бассейна располагался значительно севернее современного, примерно на 500 км. При погружении бассейн Подводников все время был глубже Восточно-Ломоносовского бассейна, разделяясь поднятием Геофизиков. Вероятно, разноэтапность погружения бассейнов до океанических глубин определила морфологию современных склонов – простую для Евразийского и сложную для Амеразийского бассейнов [9].

Континентальный склон в среднемиоцен-четвертичное время в виде проградирующих осадочных линз отчетливо проявлен на карте мощности последнего верхнего сейсмокомплекса RU–dno (рис. 3). На большей площади комплекс равномерно перекрывает все морфоструктуры [17] с незначительной вариацией мощностей от 0,2 до 0,8 км, причем преобладают мощности в 0,4–0,6 км. На поднятиях они обычно меньше, чем в смежных котловинах и прогибах. Комплекс частично отсутствует лишь в гребневой части хр. Ломоносова и отрога Геофизиков, в сводовой части поднятия Де-Лонга, поднятиях Врангелевско-Геральдском, Котельническом и Восточно-Чукотском. Его нет также в рифтовом трого хр. Гаккеля. Наименьшие мощности на поднятии Менделеева, хр. Ломоносова и Чукотском плато – не более 0,1–0,2 км. В отдельных впадинах котловин Евразийского бассейна мощности достигают 0,7 км. В котловине Макарова и седловине Толля мощности не превышают 0,3–0,4 км. На шельфе мощности комплекса варьируют от 0,2–0,3 км на поднятиях, включая Восточно-Лаптевское, до 0,5–0,6 км в осадочных бассейнах и прогибах. В Южно-Чукотском бассейне накопилось не более 400 м осадков. В то же время мощность КССК RU–dno резко возрастает до 1,5–2,3 км в поясе развития клиноформ, трассирующих молодой континентальный склон, и до 1,2–1,8 км в Лаптевоморском бассейне, состоящем из ряда изометричных впадин. На восток, к Северо-Чукотскому прогибу и Чукотскому поднятию, континентальный склон становится более пологим и широким. Соответственно, уменьшается мощность комплекса.

Особенности распределения мощностей миоцен-четвертичного комплекса позволяют сделать несколько выводов. Плащеобразный характер распределения комплекса за пределами континентального склона с близкими мощностями независимо от типа современных морфоструктур (положительных или отрицательных) свидетельствует о том, что котловины и поднятия – явление постседиментационное. Они образовались в основном после накопления осадков комплекса или на заключительных стадиях его формирования. Второй вывод следует из приуроченности мощных конусов выноса, формирующих проградационные осадочные призмы, к современному континентальному склону. Это означает, что континентальный склон начал формироваться только со среднего миоцена, и поэтому арктический океан образовался именно в это время, а не раньше. Следует заметить, что, судя по соотношению современных глубин океанических бассейнов СЛО и разнице относительных положений фондоформы и ундаформы, углубление океана продолжается. Третий вывод касается морфологической выраженности бассейна Подводников, седловины Толля и котловины Макарова. В изопакитах комплекса она оказывается сглаженной. К северу от проградационной линзы в зоне сочленения поднятия Де-Лонга и бассейна Подводников мощности комплекса одинаковы



как на седловине Толля, так и в котловине Макарова — 300–400 м, что указывает на роль новейшей тектоники в формировании этой части СЛО, комплекс накапливался в центростремительном погружающемся бассейне, а современные котловины, седловины и бассейны являются во многом следствием предшествовавшей геологической истории. Поскольку на предыдущем комплексе (олигоцен — средний миоцен) морфология структур выражена значительно лучше, погружение до океанических глубин в этой части Американо-Азиатского бассейна началось лишь с середины миоцена.

Возраст и масштабы рифтогенеза. В последнее десятилетие в результате массового сейсмопрофилирования в Арктике выявлена система горстов и грабенов, которые обнаружены исключительно в акустическом фундаменте и нижних горизонтах осадочного чехла основных поднятий, Альфа-Менделеева, Чукотском бордерленде и хр. Ломоносова [17; 21]. Вышележащая толща осадочного чехла не нарушена блоковыми движениями и с явным несогласием сплошным чехлом перекрывает все структуры региона. Одинаковое субмеридиональное простирание горстов и грабенов, ограниченных разломами, позволяет предположить их образование вследствие единого процесса растяжения, который привел к раскрытию Американо-Азиатского бассейна [14]. Утоненная кора поднятий и разделяющих их впадин — дополнительный аргумент в пользу растягивающих движений. Наличие системы грабенов и горстов считается очевидным доказательством процессов рифтогенеза [13]. Возраст несогласия в осадочном чехле — ключевой вопрос при определении времени раскрытия Американо-Азиатского бассейна — и оценивается по косвенным признакам скорости седиментации либо ранним миоценом при высокой скорости (хр. Ломоносова), либо поздним мелом при низкой скорости, что в любом варианте не согласуется с модельными временами заложения глубоководных бассейнов. Справедливо отмечено, что выявленная система меридиональных дислокаций должна учитываться при любой модели раскрытия бассейна, однако на сегодняшний день ни одна из представленных тектонических концепций не соответствует в полной мере наблюдаемым структурам растяжения [13].

Определение времени существования горстов и грабенов для разных морфоструктур и оценку масштабов и возможной природы этой системы дислокаций проиллюстрируем палеотектоническими (рис. 4, 5) и сейсмофациальными (рис. 1, 2) профилями, пересекающими основные поднятия Американо-Азиатского бассейна, и картой мощностей послепалеогеновых (ОГ ВУ—рСУ) меловых толщ (рис. 6).

Палеотектонический разрез вдоль субмеридионального профиля А7 показал повсеместное развитие складчатого позднекеммерийского фундамента в этой части хр. Ломоносова и на смежном шельфе (рис. 4). Об этом же свидетельствуют результаты драгирования на хр. Ломоносова, где среди поднятых крупномерных

обломков доминируют терригенные породы [11], идентичные породам верхоянского комплекса. Это не исключает развитие здесь элсмирских (франклинских) дислокаций, которые впоследствии были переработаны позднемезозойской пликативной тектоникой. После формирования позднекеммерийского складчатого фундамента происходят орогенез и блоковые движения с формированием вытянутой по простиранию складчатого пояса системы малоамплитудных грабенов и горстов. Апт-альбские толщи распространены повсеместно, значительно варьируя по мощности. На самом хр. Ломоносова их мощности не превышают 600–700 м. Наибольший объем комплекса зафиксирован в отдельных изометричных впадинах Восточно-Ломоносовского бассейна и его шельфовом продолжении — Новосибирском прогибе (до 3,0 и 2,0 км соответственно), что является следствием размытия гор хр. Ломоносова и накопления молассовых толщ в предгорном прогибе. По-видимому, в это же время заложились основные разломы и сформировалась блоковая структура хребта. В позднем мелу продолжается воздымание хребта, основной объем осадков перемещается в Восточно-Ломоносовский бассейн, постепенно уменьшаясь на шельфе в Новосибирском прогибе. В целом мощности верхнемелового комплекса значительно более выровненные. После предкайнозойской стабилизации хр. Ломоносова окончательно превращается в сушу, поставляя материал в Восточно-Ломоносовский бассейн и на шельф. Лишь в олигоцене хребет снова начинает погружаться и уже больше не выходит на поверхность.

Динамика блоковых движений хр. Ломоносова лучше видна на субширотном профиле (рис. 2), пересекающим хребет вкрест простирания. Отчетливо видно, как после позднекеммерийской складчатости возникает Ломоносовский ороген, ступенчато погружаясь в зарождающийся Восточно-Ломоносовский бассейн и резко обрываясь в котловину Амундсена. Поэтому разрушение орогена привело к накоплению более мощных апт-альбских молассовых толщ в Восточно-Ломоносовском бассейне — до 1,0 км и более. Последующая история хр. Ломоносова заключается в блоковом воздымании и разрушении раннемелового орогена и накоплении осадков как в смежных бассейнах, так и понижениях рельефа самого хребта, с заполнением вытянутых вдоль простирания узких межгорных впадин. После эоцена и особенно со среднего миоцена начинается окончательное погружение хр. Ломоносова на значительные глубины, выравнивание рельефа, выраженное в повсеместном распространении верхнего КССК, и лишь, предположительно, в квартале происходит новое блоковое воздымание хребта и формирование его современной морфоструктуры. Чередование погружений и поднятий приводит к сокращению ширины хребта за счет периодических и прогрессирующих опусканий его флангов как восточного в Восточно-Ломоносовский бассейн,

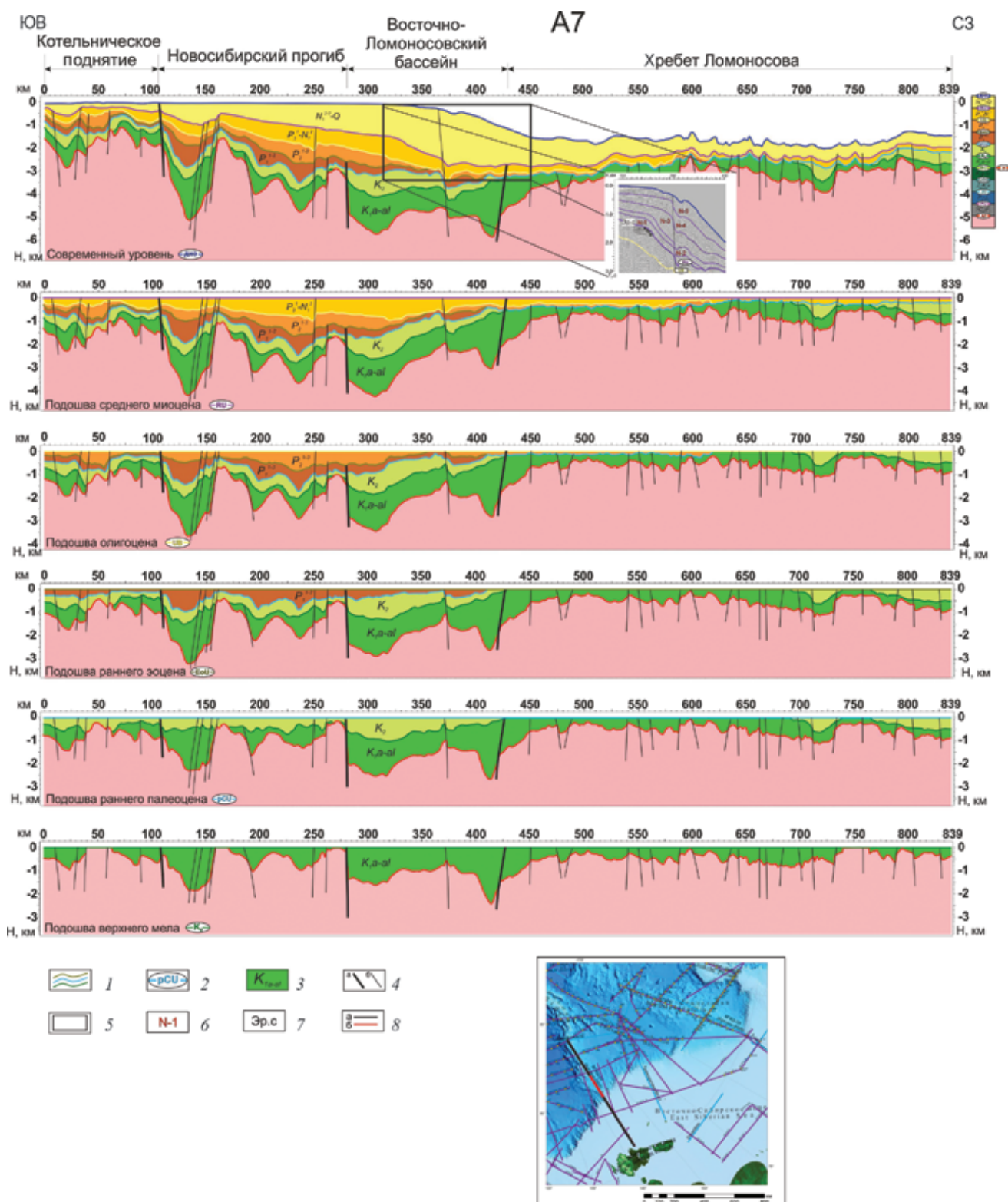


Рис. 4. Палеотектоническая реконструкция по сейсмическому профилю А7

1 — отражающие горизонты; 2 — индексы отражающих горизонтов; 3 — стратификация сейсмокомплексов; 4 — дизъюнктивные нарушения структурообразующие (а) и прочие (б); 5 — местоположение врезки эрозионного среза по опорному горизонту RU; 6 — индексы клиноформных комплексов; 7 — эрозионный срез; 8 — линии профилей (а) и линии профилей на врезках (б)

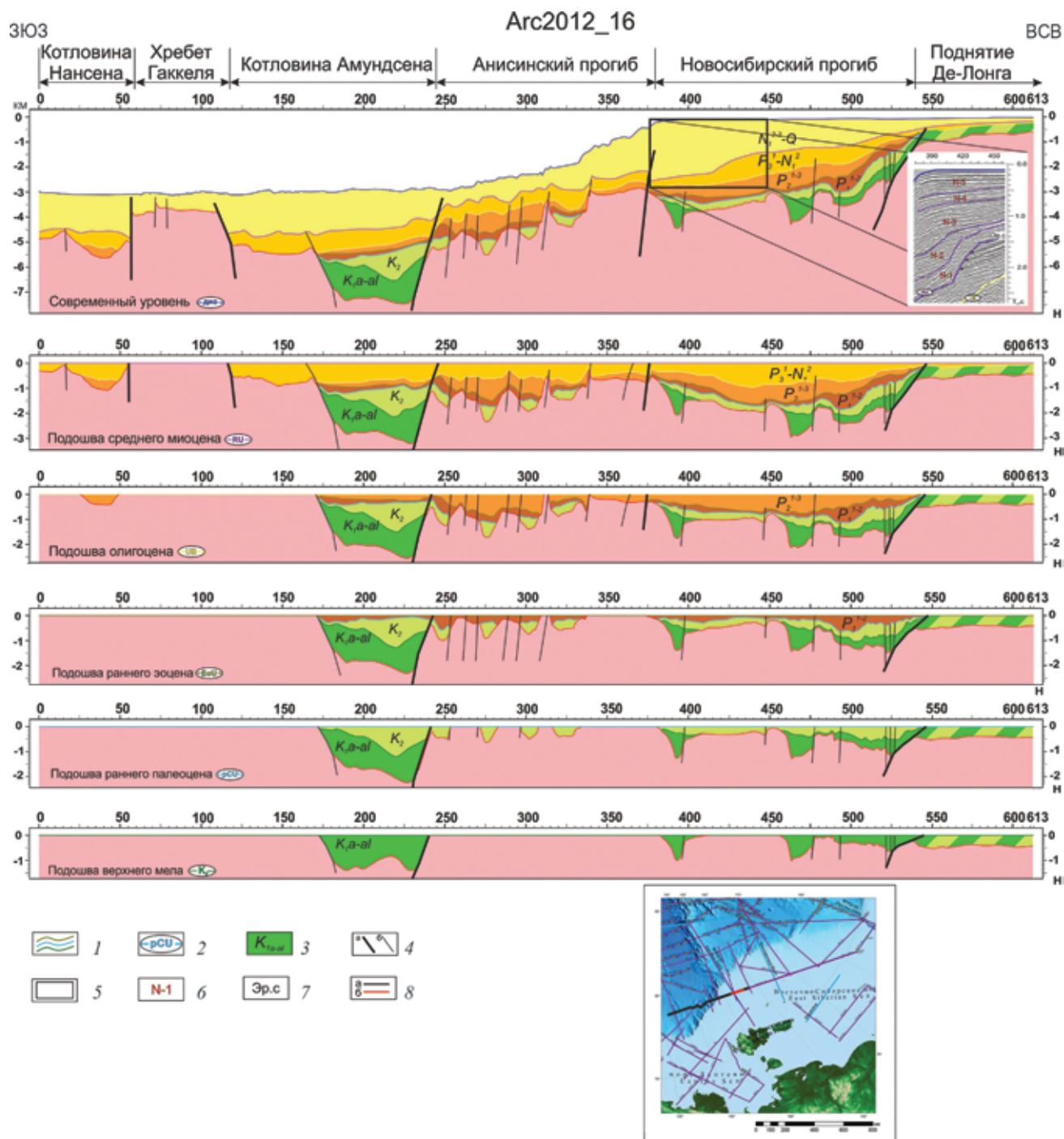
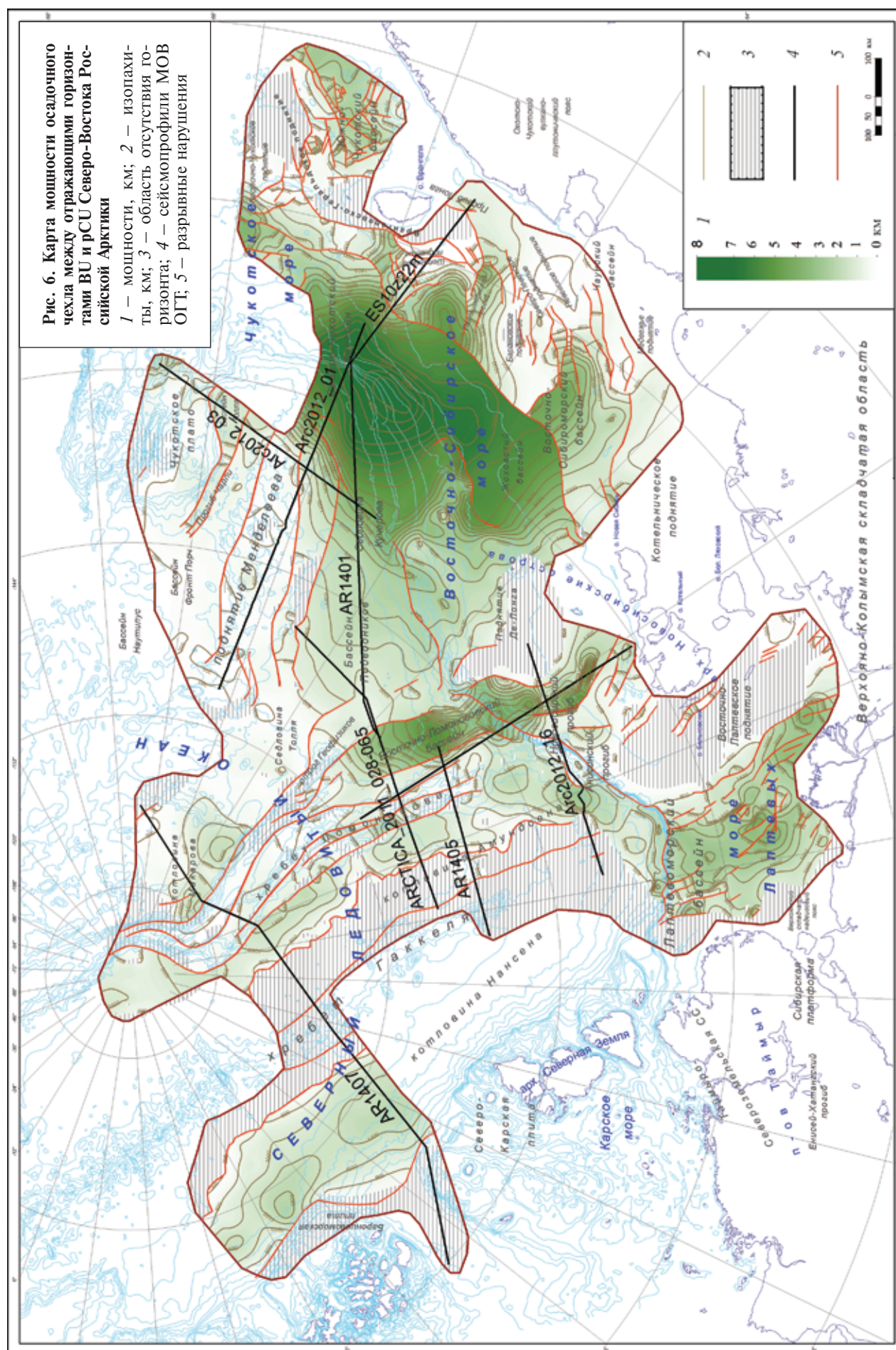


Рис. 5. Палеотектоническая реконструкция по сейсмическому профилю Arc2012_16 (глубина Н, км)

1 — отражающие горизонты; 2 — индексы отражающих горизонтов; 3 — стратификация сейсмокомплексов; 4 — дизъюнктивные нарушения структурообразующие (а) и прочие (б); 5 — местоположение врезки эрозионного среза по опорному горизонту RU; 6 — индексы клиноформных комплексов; 7 — эрозионный срез; 8 — линии профилей (а) и линии профилей на врезках (б)



так и западного в котловину Амундсена. Этот процесс прекрасно выражен на профиле AR1407, расположенном севернее предыдущего и ближе к приполюсной части хребта. Кроме центрального горста здесь вообще нет никаких грабенов, фланги горста практически открыты в сторону смежных бассейнов.

Последствия элсмирского (франклинского) орогенеза выразились в формировании горстовидных поднятий, Геофизиков и небольшого выступа фундамента на востоке бассейна Подводников, существовавших до готерив-баррема раннего мела (рис. 2). Вершинная поверхность горстов неровная, с крутыми ограниченными разломами бортами, на поднятии Геофизиков нарушена неглубоким грабеном. Горст бассейна Подводников начиная с мела никак себя не проявил, тогда как поднятие Геофизиков опускалось в апте — альбе и олигоцене и поднималось с верхнего мела до олигоцена. Значительно более рельефно и масштабно эпизелсмирские движения иллюстрируются профилем, пересекающим поднятие Менделеева и Чукотское плато вкрест простирания (рис. 1). Оба поднятия осложнены грабенами и впадинами, заложившимися со средней юры на Чукотском плато и в бассейне Толля, а с готерив-баррема на поднятии Менделеева, сопровождаясь плато-базальтовым вулканизмом. Начиная с позднего мела вершинная поверхность обоих поднятий практически полностью перекрыта осадками, запечатывая грабены. Судя по распределению мощностей, поднятия отстают в погружении от соседних бассейнов, седловины Кучерова и бассейна Толля. Разломы, сформировавшие горсто-грабеновую структуру поднятий, развиваются унаследовано от момента рождения до олигоцена — среднего миоцена. Со среднего миоцена происходит общее опускание региона до современных, относительное выравнивание рельефа и затем новое воздымание, которое формирует современный морфоструктурный облик поднятий. Грабен, разделяющий Чукотское плато и хр. Нордуинд, является наиболее контрастной структурой Чукотского бордерленда. Он последовательно углубляется в мезозое, а после замедления процесса погружения в верхнем мелу — эоцене снова начинает активно погружаться в олигоцене. Окончательно он формируется после накопления верхнего КССК, вероятно, тогда же происходит морфологическое разделение Чукотского бордерленда на Чукотское плато и хр. Нордуинд.

Субмеридиональная система горстов и грабенов развита не только на поднятиях глубоководной части СЛО, но и на Лаптевоморском шельфе и континентальном склоне в зоне сопряжения Восточно-Ломоносовского бассейна и котловины Амундсена с шельфом. Многие исследователи рассматривают эти грабены в качестве рифтов, ответственных за процессы растяжения Лаптевоморского и Евразийского бассейнов [18]. Палеотектонические реконструкции этапов формирования Анисинского и Новосибирского прогибов

показали, что они оба возникли на выступе позднекиммерийского орогена, разбитого в результате горообразования на межгорные впадины. Время существования впадин различно: ранний — поздний мел для Новосибирского и поздний мел для Анисинского прогибов (рис. 5). Морфология впадин хорошо видна на карте мощностей постапских меловых толщ (рис. 6). Это изолированные мелкие впадины, аналогичные впадинам Восточно-Ломоносовского бассейна и котловины Амундсена. Ограничивающие их разломы явно постседиментационные. После предпалеогеновой стабилизации ареал осадконакопления расширяется, формируются два самостоятельных осадочных бассейна, открытых в Восточно-Ломоносовский бассейн и котловину Амундсена, соответственно. Уже с олигоцена оба бассейна объединяются в единый бассейн, а с середины миоцена никаких следов прогибов нет, на их месте возникает шельф и континентальный склон (рис. 3). В Лаптевоморском бассейне та же ситуация — серия изометричных седиментационных бассейнов, в которых эпицентры осадконакопления смещались от этапа к этапу, разбитые разломами на постседиментационные грабены, часто без смещения изопакит. Такие же грабены, но уже определенно синседиментационные, появляются на Восточно-Лаптевском поднятии только в кайнозое, т. е. когда происходит воздымание хр. Ломоносова и он превращается в сушу.

Анализ палеотектонических разрезов и карт мощностей показал, что горсто-грабеновая структура складчатого фундамента особенно характерна для современных поднятий и хребтов глубоководной части СЛО и значительно меньше проявлена в прогибах и котловинах [13], у которых фундамент, как правило, более ровный (рис. 1, 2). Простирания грабенов и горстов соответствуют простираниям складчатых поясов, масштабы грабенов очень скромные. Они больше напоминают межхребтовые долины, чем известные рифты. Время существования горсто-грабеновых структур различно. Для областей, испытавших позднекиммерийскую складчатость, оно в основном ограничено апт-альбом — верхним мелом, а областей с элсмирским фундаментом — от верхней перми до конца мела. Выше лежащие кайнозойские осадочные толщи распространены практически повсеместно, сплошным чехлом перекрывая как положительные, так и отрицательные морфоструктуры. Утверждение о рифтогенезе как причине появления СЛО [21] вряд ли справедливо. Настоящий рифт фиксируется только на хр. Гаккеля в Евразийском бассейне. Сейсмические исследования показали, что между опусканием до океанических глубин (средний миоцен) и формированием горсто-грабеновой структуры наблюдается огромный разрыв во времени — не менее 50 млн лет для посткиммерийских (допалеогеновых) и 110–145 млн лет для постэлсмирских грабенов и горстов (доапских). Грабены Лаптевоморского шельфа образовались в связи с процессами внедрения хр. Гаккеля

в Евразийском бассейне и блоковыми движениями на хр. Ломоносова. Они в основном наложены на уже сформированную палеоструктуру. Исключение — грабены Восточно-Лаптевского поднятия [4], формировавшиеся одновременно с их заполнением осадками.

Динамика формирования разломов, их простираение, возраст и время существования, вероятно, зависят от различных причин. На шельфе Северо-Востока России в области развития поздних киммерид доминируют субширотные разломы, которые, огибая каледонский складчатый выступ поднятия Де-Лонга, разворачиваются на северо-запад на хр. Ломоносова (рис. 6). Разломы, ограничивающие горсты и грабены поднятий СЛО глубоководной части, наследуют эпиземские (франклинские до позднедевонско-каменноугольных) орогены, разделяя межгорные впадины и предгорные прогибы от соседних выступов основания. Судя по геологическим наблюдениям, на острове Врангеля [19] не исключено наложение позднекиммерийских складчатых комплексов на элсмирские (франклинские) и более древние. Большинство разломов Лаптевоморского бассейна образовалось вследствие образования хр. Гаккеля в Евразийском бассейне и, соответственно, имеют резонансную природу. Сейсмопрофилирование показало, что фундамент Лаптевоморского бассейна ровный, практически не затронут дислокациями, разломы в осадочной толще в основном без смещений [4]. Они явно моложе предаптического фундамента. Возраст этих разломов определяется временем внедрения хр. Гаккеля и включением спредингового механизма. Такая же причина образования системы грабенов и горстов на Восточно-Лаптевском поднятии. Однако заполнение грабенов кайнозойскими осадками здесь происходило одновременно с их формированием в результате разрушения консолидированных пород горстов и выступов фундамента. Наконец, значительная часть сквозных разломов образовалась в новейшее время и связана с формированием континентального склона и крупных морфоструктур (рис. 3). Простираение таких разломов комплементарно простираению соответствующих форм рельефа, а масштабы определяются градиентностью движений. Разломы хр. Ломоносова полигенетичны и разновозрастны. Они являются следствием как верхоянской складчатости и орогенеза, так и более молодых движений, обусловивших формирование хр. Гаккеля и современных морфоструктур.

Заключение. Выполненная работа по сейсмо-стратиграфическому анализу осадочной толщи Северо-Востока Российской Арктики позволяет дать ответы на поставленные вопросы о времени главного погружения до океанических глубин, возрасте и масштабах рифтогенеза.

1. На основании сейсмофациального анализа сейсмических данных, формирование современного шельфа, континентального склона, глубоких котловин и абиссальных равнин

в Евразийском и Амеразийском бассейнах началось одновременно в олигоцене и резко усилилось со среднего миоцена, с ОГ RU. Только с этого времени оба бассейна погрузились до современных глубин. Глубоководные осадки верхнего комплекса (RU—дно) плащеобразно перекрывают как поднятия Ломоносова, Менделеева и Чукотское, так и смежные котловины в соизмеримых мощностях. Значит, до формирования верхнего комплекса произошло общее выравнивание рельефа субстрата, что прекрасно видно по эрозионному характеру ОГ RU, и, соответственно, современные морфоструктуры имеют неотектоническую природу. Установлена разнотактность погружения бассейнов, которая определила морфологию современных склонов — простую для Евразийского и сложную для Амеразийского бассейнов.

2. Палеотектонические реконструкции разрезов и анализ карт мощностей показали, что утверждение о рифтогенезе как причине появления СЛО вряд ли справедливо. Грабены и горсты приурочены исключительно к поднятиям, и их простираение определяется простираением складчатых поясов и орогенов соответствующего возраста. Они возникли на орогенной стадии развития поднятий, разбитых в результате горообразования на межгорные и предгорные впадины и прогибы. Масштабы грабенов очень скромные и не коррелируются с известными рифтами. Исключением является спрединговый хр. Гаккеля с отчетливой рифтовой долиной (рис. 2, в). По сейсмическим данным, между опусканием до океанических глубин (средний миоцен) и формированием горсто-грабеновой структуры наблюдается огромный разрыв во времени — не менее 50 млн лет для посткиммерийских (допалеогеновых) и 110–145 млн лет для постэлсмирских грабенов и горстов (доапт-альбских). Грабены Лаптевоморского шельфа образовались в связи с процессами внедрения хр. Гаккеля в Евразийском бассейне и блоковыми движениями на хр. Ломоносова и в основном наложены на уже сформированную палеоструктуру. Динамика развития разломов определяется временем заложения и существования грабенов и горстов.

3. Сейсмофациальный и палеотектонический анализы продемонстрировали, что погружение до современных глубин в Евразийском и Амеразийском бассейнах СЛО произошло по какой-то общей причине, не связанной с постэлсмирским и позднекиммерийским грабенообразованием (рифтогенезом?) и формированием трапповых полей. В Евразийском бассейне масштабное погружение, вероятно, обусловлено миоценовым рифтогенезом, в результате которого сформировался спрединговый хр. Гаккеля.

2. Грамберг И. С. Сравнительная геология и минерализация океанов и континентальных окраин с позиций стадийного развития океанов // *Российская Арктика: геологическая история, минерализация, геоэкология* / гл. ред. Д. А. Додин, В. С. Сурков. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. — С. 17–34.
 3. Дараган-Сушов Ю. И., Дараган-Сушова Л. А., Поселов В. А. К вопросу о стратиграфии осадочного чехла Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана // *Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона*. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. — Вып. 4. — С. 103–113.
 4. Дараган-Сушова Л. А. Новый взгляд на геологическое строение осадочного чехла моря Лаптевых / Л. А. Дараган-Сушова, О. В. Петров, Ю. И. Дараган-Сушов, Д. Д. Рукавишников // *Региональная геология и металлогения*. — 2010. — № 41. — С. 5–16.
 5. Дараган-Сушова Л. А. К обоснованию стратиграфической привязки опорных сейсмических горизонтов на Восточно-Арктическом шельфе и в области Центрально-Арктических поднятий / Л. А. Дараган-Сушова, Н. Н. Соболев, Е. О. Петров, Л. Р. Гринько, Н. А. Петровская, Ю. И. Дараган-Сушов // *Региональная геология и металлогения*. — 2014. — № 58. — С. 5–21.
 6. Дараган-Сушова Л. А. Геология и тектоника северо-востока Российской Арктики (по сейсмическим данным) / Л. А. Дараган-Сушова, О. В. Петров, Н. Н. Соболев, Ю. И. Дараган-Сушов, Л. Р. Гринько, Н. А. Петровская // *Геотектоника*. — 2015. — № 6. — С. 3–19.
 7. Дараган-Сушова Л. А. Геология и история формирования котловины Подводников Северного Ледовитого океана по сейсмическим данным / Л. А. Дараган-Сушова, О. В. Петров, Н. Н. Соболев, Ю. И. Дараган-Сушов, И. В. Попова // *Региональная геология и металлогения*. — 2017. — № 71. — С. 5–18.
 8. Дараган-Сушова Л. А., Читайло Д. М., Зимовский А. В. Скоростной анализ осадочных бассейнов Северного Ледовитого океана // *Региональная геология и металлогения*. — 2017. — № 71. — С. 67–74.
 9. Зинченко А. Г. Два типа континентальных склонов в Северном Ледовитом океане (в связи с проблемой внешней границы континентального шельфа) // 70 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане / под ред. В. Д. Каминского, Г. П. Аветисова, В. Л. Иванова. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2018. — С. 31–39.
 10. Мейен С. В. От общей к теоретической стратиграфии // *Советская геология*. — 1981. — № 9. — С. 58–69.
 11. Морозов А. Ф. Новые геологические данные, обосновывающие континентальную природу области Центрально-Арктических поднятий / А. Ф. Морозов, О. В. Петров, С. П. Шокальский, С. Н. Кашубин, А. А. Кременецкий, М. Ю. Шкатов, В. Д. Каминский, Е. А. Гусев, Г. Э. Грикуров, П. В. Рекант, С. С. Шевченко, С. А. Сергеев, В. В. Шатов // *Региональная геология и металлогения*. — 2013. — № 53. — С. 34–55.
 12. Сейсмическая стратиграфия. В 2-х томах / под ред. Ч. Пейтона. — М.: Мир, 1982. — 846 с.
 13. Arrigoni V. Origin and Evolution of the Chukchi Borderland: Master's Thesis. — Texas A&M University, 2009. — 74 p.
 14. Brumley K. Geologic history of the Chukchi Borderland, Arctic Ocean: Ph. D. Thesis. — Stanford University, 2014. — 254 p.
 15. Bruvoll V., Kristoffersen Y., Coakley B. J., Hopper J. R., Planke S., Kandilarov A. The nature of the acoustic basement on Mendeleev and northwestern Alpha ridges, Arctic Ocean // *Tectonophysics*. — 2012. — Vol. 514. — Pp. 123–145.
 16. Dargan-Sushchova L., Grin'ko L., Petrovskaya N. and Dargan-Sushchov Yu. On the problem of stratigraphic assignment of the key seismic horizons on the East-Arctic Shelf and in the area of Central Arctic uplifts // *American Journal of Geosciences*. — 2015. — Vol. 5, N. 1. — Pp. 1–11.
 17. Dove D., Coakley B., Hopper J., Kristoffersen Y. and HLY0503 Geophysics Team. Bathymetry, controlled source seismic and gravity observations of the Mendeleev ridge; implications for ridge structure, origin, and regional tectonics // *Geophysical Journal International*. — 2010. — Vol. 183 (2). — Pp. 481–502.
 18. Drachev S. S., Savostin L. A., Groshev V. G. and Bruni I. E. Structure and geology of the continental shelf of the Laptev Sea, Eastern Russian Arctic // *Tectonophysics*. — 1998. — Vol. 298. — Pp. 357–393.
 19. Kos'ko M. K., Cecile M. P., Harrison J. C., Ganellin V. G., Khandoshko N. V. and Lopatin B. G. Geology of Wrangel Island, between Chukchi and East Siberian Seas, Northeastern Russia // *Geological Survey of Canada Bulletin*. — 1993. — Vol. 461. — 102 p.
 20. The Cenozoic palaeoenvironment of the Arctic Ocean / Ed. by K. Moran, J. Backman, H. Brinkhuis, S. C. Clemens, T. Cronin, G. R. Dickens, F. Eynaud, J. Gattacceca, M. Jakobsson, R. W. Jordan, M. Kaminski, J. King, N. Koc, A. Krylov, N. Martinez, J. Matthiessen, D. McInroy, T. C. Moore, J. Onodera, M. O'Regan, H. Pälike, B. Rea, D. Rio, T. Sakamoto, D. C. Smith, R. Stein, K. St. John, I. Suto, N. Suzuki, K. Takahashi, M. Watanabe, M. Yamamoto, J. Farrell, M. Frank, P. Kubik, W. Jokat, Y. Kristoffersen // *Nature*. — 2006. — Vol. 441 (7093). — Pp. 601–605.
 21. Nikishin A. M., Petrov E. I., Malyshev N. A., Ershova V. P. Rift systems of the Russian Eastern Arctic shelf and Arctic deep water basins: link between geological history and geodynamics // *Geodynamics & Tectonophysics*. — 2017. — Vol. 8 (1). — Pp. 11–43.
-
1. Arkticheskiy basseyn (geologiya i morfologiya) [Arctic Basin (geology and morphology)]. Ed. Kaminskiy V. D. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya. 2017. 291 p.
 2. Gramberg I. S. Comparative geology and mineralogeny of the oceans and continental margins from the position of the staged development of the oceans. *Russian Arctic: geological history, mineralogy, geoecology*. Chief editors D. A. Dodin, V. S. Surkov. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya. 2002. Pp. 17–34. (In Russian).
 3. Dargan-Sushchov Yu. I., Dargan-Sushchova L. A., Poselov V. A. On the stratigraphy of the sedimentary cover of the Eurasian Basin of the Arctic Ocean. *Geological and geophysical characteristics of the lithosphere of the Arctic Region*. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya. 2002. Iss. 4, pp. 103–113. (In Russian).
 4. Dargan-Sushchova L. A., Petrov O. V., Dargan-Sushchov Yu. I., Rukavishnikova D. D. A new look at the geological structure of the sedimentary cover of the Laptev Sea. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2010. No. 41, pp. 5–16. (In Russian).
 5. Dargan-Sushchova L. A., Sobolev N. N., Petrov E. O., Grin'ko L. R., Petrovskaya N. A., Dargan-Sushchov Yu. I. To the justification of the stratigraphic reference of reference seismic horizons on the East Arctic shelf and in the Central Arctic uplifts. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2014. No. 58, pp. 5–21. (In Russian).
 6. Dargan-Sushchova L. A., Petrov O. V., Sobolev N. N., Dargan-Sushchov Yu. I., Grin'ko L. R., Petrovskaya N. A. Geology and tectonics of the north-east of the Russian Arctic (according to seismic data). *Geotektonika*. 2015. No. 6, pp. 3–19. (In Russian).
 7. Dargan-Sushchova L. A., Petrov O. V., Sobolev N. N., Dargan-Sushchov Yu. I., Popova I. V. Geology and the history of the formation of the basin of the Arctic Ocean Submariners according to seismic data. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2017. No. 71, pp. 5–18. (In Russian).
 8. Dargan-Sushchova L. A., Chitaylo D. M., Zimovskiy A. V. Velocity analysis of sedimentary basins of the Arctic Ocean. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2017. No. 71, pp. 67–74. (In Russian).
 9. Zinchenko A. G. Two types of continental slopes in the Arctic Ocean (in connection with the problem of the outer boundary of the continental shelf). *70 years in the Arctic*,

- Antarctic and World Ocean*. Ed. by V. D. Kaminskiy, G. P. Avetisov, V. L. Ivanov. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya. 2018. Pp. 31–39. (In Russian).
10. Meyen S. V. From general to theoretical stratigraphy. *Sovetskaya geologiya*. 1981. No. 9, pp. 58–69. (In Russian).
11. Morozov A. F., Petrov O. V., Shokal'skiy S. P., Kashubin S. N., Kremenetskiy A. A., Shkatov M. Yu., Kaminskiy V. D., Gusev E. A., Griukov G. E., Rekant P. V., Shevchenko S. S., Sergeev S. A., Shatov V. V. New geological data substantiating the continental nature of the region of Central Arctic uplifts. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2013. No. 53, pp. 34–55. (In Russian).
12. Seismicheskaya stratigrafiya [Seismic stratigraphy]. V 2-kh tomakh. Ed. by Ch. Peyton. Moscow: Mir. 1982. 846 p.
13. Arrigoni, V. 2009: *Origin and Evolution of the Chukchi Borderland*. Master's Thesis. Texas A&M University. 74.
14. Brumley, K. 2014: *Geologic Nature of the Chukchi Borderland, Arctic Ocean*. Ph. D. Thesis. Stanford University. 254.
15. Bruvoll, V., Kristoffersen, Y., Coakley, B. J., Hopper, J. R., Planke, S., Kandilarov, A. 2012: The nature of the acoustic basement on Mendeleev and northwestern Alpha ridges, Arctic Ocean. *Tectonophysics*. 514. 123–145.
16. Daragan-Sushchova, L., Grin'ko, L., Petrovskaya, N. and Daragan-Sushchov, Yu. 2015: On the problem of stratigraphic assignment of the key seismic horizons on the East-Arctic Shelf and in the area of Central Arctic uplifts. *American Journal of Geosciences*. 5. 1. 1–11.
17. Dove, D., Coakley, B., Hopper, J., Kristoffersen, Y. and HLY0503 Geophysics Team. 2010: Bathymetry, controlled source seismic and gravity observations of the Mendeleev ridge; implications for ridge structure, origin, and regional tectonics. *Geophysical Journal International*. 183 (2). 481–502.
18. Drachev, S. S., Savostin, L. A., Groshev, V. G. and Bruni, I. E. 1998: Structure and geology of the continental shelf of the Laptev Sea, Eastern Russian Arctic. *Tectonophysics*. 298. 357–393.
19. Kos'ko, M. K., Cecile, M. P., Harrison, J. C., Ganellin, V. G., Khandoshko, N. V. and Lopatin B. G. 1993: Geology of Wrangel Island, between Chukchi and East Siberian Seas, Northeastern Russia. *Geological Survey of Canada Bulletin*. 461. 102.
20. Moran, K., Backman, J., Brinkhuis, H., Clemens, S. C., Cronin, T., Dickens, G. R., Eynaud, F., Gattacceca, J., Jakobsen, M., Jordan, R. W., Kaminski, M., King, J., Koc, N., Krylov, A., Martinez, N., Matthiessen, J., McInroy, D., Moore, T. C., Onodera, J., O'Regan, M., Pálke, H., Rea, B., Rio, D., Sakamoto, T., Smith, D. C., Stein R., St. John, K., Suto, I., Suzuki, N., Takahashi, K., Watanabe, M., Yamamoto, M., Farrell, J., Frank, M., Kubik, P., Jokat, W., Kristoffersen, Y. 2006: The Cenozoic palaeoenvironment of the Arctic Ocean. *Nature*. 441 (7093). 601–605.
21. Nikishin, A. M., Petrov, E. I., Malyshev, N. A., Ershova, V. P. 2017: Rift systems of the Russian Eastern Arctic shelf and Arctic deep water basins: link between geological history and geodynamics. *Geodynamics & Tectonophysics*. 8 (1). 11–43.

Дареган-Суцкова Лидия Анатольевна — канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹. <LDaragan@vsegei.ru>

Зинченко Валерий Николаевич — канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹. <valery_zinchenko@vsegei.ru>

Дареган-Суцов Юрий Иосифович — канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. акад. И. С. Грамберга (ВНИИОкеан-геология). Английский пр., 1, Санкт-Петербург, 190121, Россия. <ydarag@vniio.nw.ru>

Савельев Иван Николаевич — инженер, ВСЕГЕИ¹. <Ivan_Savelyev@vsegei.ru>

Daragan-Sushchova Lidia Anatol'evna — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Lead Researcher, VSEGEI¹. <LDaragan@vsegei.ru>

Zinchenko Valeriy Nikolaevich — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Lead Researcher, VSEGEI¹. <valery_zinchenko@vsegei.ru>

Daragan-Sushchov Yuriy Iosifovich — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Lead Researcher, The All-Russia Scientific Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean named after academician I. S. Gramberg (VNIIOkeangeologia). 1 Angliyskiy pr., St. Petersburg, 190121, Russia. <ydarag@vniio.nw.ru>

Savelyev Ivan Nikolaevich — Engineer, VSEGEI¹. <Ivan_Savelyev@vsegei.ru>

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, 199106, Russia.