

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



ФРЕЙМАН СЕРГЕЙ ИГОРЕВИЧ

**СЕЙСМОСТРАТИГРАФИЯ И ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ СЕВЕРО-ЧУКОТСКОГО
БАСЕЙНА И СОПРЯЖЕННЫХ РАЙОНОВ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА**

25.00.01 – Общая и региональная геология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре региональной геологии и истории Земли геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** **Никишин Анатолий Михайлович** – доктор геолого-минералогических наук, профессор
- Официальные оппоненты** **Ахманов Григорий Георгиевич** – кандидат геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», доцент кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых
- Веселовский Роман Витальевич** – доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», профессор кафедры динамической геологии
- Соколов Сергей Юрьевич** – доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Геологический институт РАН», заведующий лабораторией геоморфологии и тектоники дна океанов, главный научный сотрудник

Защита диссертации состоится «28» мая 2021 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета МГУ.04.04 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: **119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, ауд. 415.**

E-mail: nvbadulina@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/366240469/>

Автореферат разослан « » апреля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.04.04,
кандидат геолого-минералогических наук



Ю.А. Гатовский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. В настоящее время вся Арктика в целом и Северо-Чукотский бассейн (СЧБ) в частности остаются одними из наименее изученных в геологическом плане регионов Земли. Этот регион имеет высокий углеводородный потенциал, однако, его строению и стратиграфии посвящено сравнительно мало научных работ. Имеющиеся схемы стратификации существенно различаются между собой, до сих пор не существует консенсуса ни по тектонической истории региона, ни по схеме расчленения осадочного чехла, ни по основным чертам палеогеографии региона. В опубликованной литературе освещены только общие тренды развития региона без описания конкретных геологических событий и их сопоставления с общеарктическим геологическим контекстом. Тем не менее, накопленный на настоящий момент объем данных позволяет перейти к более детальному описанию и количественным оценкам тех или иных событий - степени деформации территории, точному положению палеогеографических зон и т.д. В последние годы было получено большое количество новых сейсморазведочных данных, которые до настоящего времени не были полностью проанализированы и опубликованы в открытых источниках.

Степень разработанности темы. Первые работы, основанные на сейсморазведочных данных, были опубликованы в 70-80-е годы прошлого столетия [Виноградов, В.А. Гапоненко, Грамберг, Шимараев, 1976; Коган, 1981; Пушаровский, 1976; Шипилов, Сенин, Юнов, 1989; Моря Советской Арктики, 1980]. Тогда были выделены основные осадочные бассейны Высокой Арктики, среди которых Северо-Чукотский бассейн, и в общих чертах была определена структура земной коры этого региона.

Вторым этапом изучения территории можно назвать 2000-е годы, когда с ростом количества геолого-геофизических данных начали появляться обоснованные выводы о возрасте осадочного чехла шельфовых бассейнов и проводится корреляция опорных отражающих горизонтов (ОГ) между этой и сопредельными территориями [Sekretov, 2001; Verzhbitsky и др., 2008; Шипелькевич, Бурлин, 2003].

Третий, современный, этап начался в 2010-е годы, когда произошел валовый прирост объема геофизической информации, и было сделано большое количество региональных мультиканальных съемок методом общей глубинной точки (МОГТ). Результатам обработки и интерпретации этих данных посвящен ряд статей, но схема стратиграфического расчленения осадочного чехла, и, как следствие, датировка основных геологических событий существенно различаются [Nikishin, Malyshev, Petrov, 2014; Petrov et al., 2016; Дараган-Суцова и др., 2015; Петровская, Савишкина, 2014; Поселов и др., 2017; Рекант, Гусев, 2012].

Цели и задачи исследований. Целью исследований является расшифровка геологической истории Северо-Чукотского бассейна и сопредельных с ним шельфовой и глубоководной частей Американо-Евразийского бассейна с момента их заложения до момента формирования современной осадочной структуры территории.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. составить единую базу данных федеральных и доступных коммерческих сейсмических профилей в пределах Американо-Евразийского и Евразийского бассейнов для надежной корреляции основных отражающих горизонтов и регионального сопоставления выделенных событий;
2. провести сейсмостратиграфическую и тектоностратиграфическую интерпретацию всех доступных сейсмических профилей;
3. осуществить возрастную привязку выделенных горизонтов к скважинам шельфа Аляски, линейным магнитным аномалиям Евразийского бассейна, скважине АСЕХ и основным тектоническим и палеогеографическим событиям региона;
4. создать плит-тектоническую модель развития территории в мезо-кайнозой и изучить её соотношение с глобальной тектонической моделью для этого времени;
5. выделить и описать основные этапы геологического развития территории в мезо-кайнозой; выделить значимые локальные палеогеографические и тектонические события региона.

Фактический материал и методы исследований. В основу работы положены федеральные мультиканальные сейсмические профили 2011, 2012 и 2014 гг. съемки; данные коммерческих съемок ION 2011, 2012 и 2015 гг., охватывающие территорию Сибирского шельфа; сейсмические профили МАГЭ 2016 г., покрывающие территорию поднятия Де Лонга и близлежащую часть котловины Подводников. Всего было проинтерпретировано более 40 000 погонных км (пог. км) сейсмических данных 2D.

Интерпретация сейсмических данных была произведена в ПО «Petrel». Описание и расшифровка истории палеогеографического развития территории производилось с использованием методик сейсмофациального анализа и анализа траектории миграции бровки шельфа. Для построения плит-тектонической модели использовали открытое ПО «GPlates 2.1». Численные расчеты и визуализация статистических данных производили на базе языка программирования Python с использованием модулей pandas и seaborn.

Достоверность результатов исследований. Независимая датировка опорных горизонтов сразу по пяти источникам данных (1. скважины на шельфе Аляски, 2. линейные магнитные аномалии Евразийского бассейна, 3. основные геологические события, зафиксированные на близлежащих островах и суше сопредельной территории Сибири, 4.

скважинные данные бурения на хребте Ломоносова – АСЕХ, 5. скважина на острове Айон) свидетельствует о высокой достоверности полученных результатов. Достаточная достоверность также обусловлена надежностью корреляции отражающих горизонтов по акватории за счет высокой разрешающей способности фактических сейсморазведочных данных МОГТ. В настоящее время такие материалы являются одними из главных источников информации при региональных исследованиях слабоизученных акваторий и применяются как при научных, так и при высокобюджетных коммерческих исследованиях.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в интерпретации данных сейсморазведки, выделении и прослеживании отражающих горизонтов и событийной интерпретации выделенных горизонтов. Личной задачей автора являлось создание плит-тектонической схемы на основе численной интерпретации степени растяжения земной коры в изучаемом регионе. Также автор в составе геофизической группы принимал участие в экспедиции PS 115/2 на судне Polarstern в 2018 году. В ходе экспедиции была произведена сейсмическая мультиканальная съемка южной части хребта Ломоносова и близлежащей части бассейна Амундсена. Кроме того, автор принимал участие в изучении и описании образцов, отобранных с помощью Научно-исследовательской подводной лодки (НИПЛ) на хребте Менделеева в 2014-2016 гг.

Научная новизна. Впервые была описана проградация шельфа в пределах Северо-Чукотского бассейна в кайнозойское время и определено положение бровки шельфа для различных временных этапов. Была расшифрована кайнозойская история бассейна, которой ранее практически не уделялось внимания. Впервые был обоснован факт начала глубоководной циркуляции одновременно в пределах Амеразийского и Евразийского бассейнов в момент открытия пролива Фрама. Для Евразийского бассейна это событие было установлено после бурения скважины АСЕХ, но факт начала циркуляции также и в Амеразийском бассейне позволяет говорить об относительной погруженности хребта Ломоносова в этот момент.

В рамках диссертационной работы была произведена количественная оценка растяжения территории арктического шельфа Восточной Сибири. На её основе была построена новая плит-тектоническая модель развития арктического шельфа Восточной Сибири в апт-альбское время. Был выявлен глобальный характер деформаций арктических территории происходивших одновременно с развитием высокоширотной арктической магматической провинции. Ранее возможность такого тектонического события рассматривалась, но оставалась на уровне предположения. Полученная модель была встроена в общеземную плит-тектоническую модель для апт-альбского времени. Кроме того, впервые была определена ориентировка поля напряжений для среднеэоценового этапа деформаций арктического шельфа Восточной Сибири. Ранее наличие этих деформаций отмечалось в работах, посвященных отдельным территориям, в

рамках диссертационной работы была определена общая ориентировка и область развития указанных деформаций.

Теоретическая и практическая значимость. В настоящей работе была создана количественная тектоническая модель заложения основных рифтовых структур Американо-Чукотского бассейна в апт-альбское время. Такая модель в дальнейшем может быть использована для создания модели погружения территории с последующей оценкой нефтематеринского потенциала. Оценка среднеэоценовых деформаций, сделанная в диссертационной работе, может быть положена в основу численного бассейнового моделирования.

Определенное в данной работе положение бровки шельфа для кайнозойского интервала геологической истории Северо-Чукотского бассейна позволяет выделить перспективные зоны развития песчаных тел коллекторов различного генезиса для дальнейшего поиска и разведки месторождений углеводородов. Полученное в диссертационной работе подтверждение вовлеченности Американо-Чукотского бассейна в глобальную систему циркуляции океанических вод одновременно с открытием пролива Фрама позволяет уточнить существующие численные модели эволюции климата всей Земли и Арктики, в частности.

Защищаемые положения.

1. Северо-Чукотский бассейн характеризуется клиноформным многостадийным заполнением. Первая, поздне мел-палеоэоценовая фаза, привела к формированию современной глубоководной террасы Кучерова, бровка которой соответствует положению бровки палеошельфа на тот момент. Далее, в начале среднего эоцена произошло резкое отступление береговой линии на юг и накопление второго клиноформного комплекса, проградация которого продолжалась вплоть до современного положения бровки шельфа.

2. В момент открытия пролива Фрама произошла перестройка гидрологического режима не только Евразийского, но и Американо-Чукотского бассейна, выразившаяся в формировании устойчивых придонных течений современного облика.

3. В апт-альбское время территория Американо-Чукотского бассейна испытала региональный рифтинг, в ходе которого были заложены современные осадочные бассейны арктического шельфа Сибири, в том числе Северо-Чукотский бассейн. Растяжение проходило в субширотном направлении и составило 400-450 км.

4. В начале среднего эоцена на территории Северо-Чукотского бассейна произошла кратковременная фаза тектонических деформаций, выразившаяся в формировании многочисленных малоамплитудных сбросов. Данный этап характеризуется трансензионными обстановками с субширотной ориентировкой оси растяжения.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 16 работ: 5 статей в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных WoS, Scopus, RSCI, в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ, 1 коллективная монография и 10 материалов совещаний и тезисов докладов. Результаты диссертационной работы представлены на научных конференциях и совещаниях: *Тектоническое совещание* (Москва, 2017, 2018, 2020), на международной конференции по геологии Арктических окраин *ICAM - International Conference on Arctic Margins* (Стокгольм, 2018), и на международной конференции EGU – *Europe Geoscience Union* (Вена, 2017, 2018, 2019).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения, списка цитируемой литературы, списка использованных сокращений. Работа содержит 73 рисунка и 2 приложения. Общий объем работы составляет 162 страницы, без приложений – 156 страниц. Список литературы насчитывает 143 наименования.

Благодарности. В первую очередь автор выражает искреннюю благодарность за неоценимую помощь в работе над диссертацией, и плодотворные обсуждения научному руководителю профессору МГУ им. М.В. Ломоносова – Никишину А.М.

Автор благодарен Петрову Е. И. и Корнийчуку А. В. за возможность работы с большой коллекцией новейших сейсмических данных региона. Отдельную благодарность автор хочет выразить всему коллективу Геослужбы ГИН РАН, в особенности Безъязыкову А.В., Алешиной О.Б. и Сиротенко Д.О. за помощь в освоении специализированного ПО и консультации по многочисленным техническим вопросам.

Автор выражает искреннюю благодарность Сколотневу С.Г. за продуктивное обсуждение тематических научных проблем и возможность работы с образцами, отобранными на территории хребта Менделеева.

Особенную благодарность автор выражает Estella Weigelt за предоставленную возможность участия в арктической экспедиции 2018 года на судне Polarstern, и за консультации по технической и практической базе морской сейсморазведки. А также всему экипажу и научной группе рейса PS 115/2 за прекрасную компанию и атмосферу научной экспедиции. Свою искреннюю благодарность автор выражает Carmen Gaina за крайне продуктивное обсуждение многих результатов работы, помощь в освоении специализированного ПО и возможность стажировки в одном из ведущих европейских центров наук о Земле - CEED.

Автор особенно благодарен своей жене Софье, за неоценимую моральную и мотивационную поддержку во время написания диссертационной работы, а также своему сыну Петру, за проявленное понимание.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-35-00133, 18-05-70011 и 18-05-00495.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложено обоснование актуальности темы диссертационной работы, определена цель и сформулированы основные задачи исследования, дан краткий обзор содержательной части диссертации.

Глава 1. Геолого-геофизическая изученность. В главе описано расположение территории исследования и охарактеризованы основные этапы геолого-геофизического изучения региона (Рис. 1).

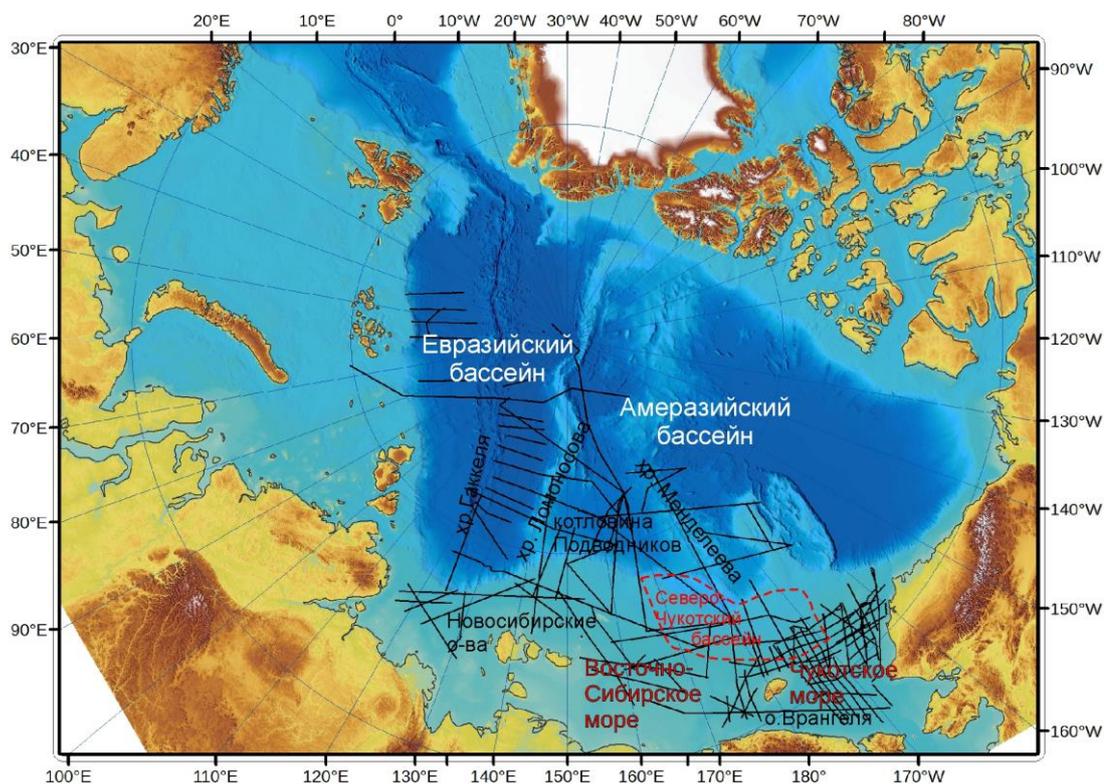


Рис. 1 Обзорная карта района исследования и основные географические названия. Красным пунктиром обведены контуры Северо-Чукотского бассейна, черные линии – сейсмические профили использованные в работе.

В разделе **1.1 - Дистанционные геофизические методы** - перечислены проведенные в регионе сейсморазведочные и гравимагнитные работы с кратким описанием результатов исследований. Исследование региона началось в 60-е годы прошлого столетия, первые работы носили обзорный характер. Первые экспедиции были организованы в 60-70-е годы силами полярной геофизической экспедиции НИИГА. Затем работы выполняли МАГЭ ПГО «Севморгеология», СМНГ ПГО «Севморгеология», ЛАРГЕ и Дальморнефтегеофизика. В 90-е годы началась разведка недр частными российскими и зарубежными компаниями. В разные годы сейсмические исследования выполняли Halliburton, British Petroleum, GX Technology (ION), АО «РН-Шельф-Дальний-Восток», ОАО МАГЭ, ОАО ГНИГНИ, ОАО ДМНГ и другие. При этом

большая часть региональных исследований все так же выполнялась государственными институтами – ФГУПНПП «Севморгео», ВНИИОкеангеология и др.

В настоящее время весь район покрыт кондиционной магнитометрической съемкой масштаба 1: 2 000 000 и гравиметрической съемкой масштаба 1: 2 500 000. До начала 2000-х годов для региона имелись только отдельные региональные сейсморазведочные профили, выполненные разными методами. Первые регулярные съемки начали появляться с 2005 года, когда компанией TGS было отснято 3500 км 2D сейсмических профилей в Чукотском море.

В разделе **1.2 - Прямые геологические данные** - приведены основные прямые источники информации о геологическом строении региона. Ближайшие обнажения находятся на острове Врангеля, начало планомерного изучения которого также пришлось на 60-70-е года. Основные выводы о геологической истории территории были представлены Г.С. Гнибиденко, О.Н. С.М.Тильманом, Ивановым О.Н., и др. [Гнибиденко, 1968; Иванов, 1973; Тильман, Бялобжеский, Чехов, 1964]. В 1980-е годы была пробурена скважина на острове Айон [Александрова, 2016; Слободин и др., 1990], в 90-е годы на шельфе Аляске было пробурено 5 разведочных скважин. В ходе работ были вскрыты и детально охарактеризованы все стратиграфические комплексы этого региона [Sherwood et al, 2002]. В 2004 году в центральной части хребта Ломоносова была пробурена скважина ACEX [Backman et al., 2008], по результатам бурения которой были дополнены и пересмотрены многие выводы о кайнозойской палеогеографии Арктического региона в целом. Глубокого картировочного бурения непосредственно на акватории Северо-Чукотского бассейна пока не производилось.

В главе **2 - Сеймостратиграфический и сеймофациальный анализы** - приводится описание основных методик, использованных при интерпретации обстановок осадконакопления и анализа геологической истории территории. Сеймостратиграфия как метод была заложена в 1970-е годы, метод включает сеймостратиграфический и сеймофациальный анализы. Изучение стратиграфии и осадочных фаций при сеймостратиграфическом подходе осуществляют посредством интерпретации данных сейсморазведки [Сейсмическая стратиграфия, 1982]. Сеймофациальный анализ заключается в описании и геологической интерпретации параметров сейсмических отражений, включая их конфигурацию, непрерывность, амплитуду, частотный спектр и интервальные скорости [Сейсмическая стратиграфия, 1982]. В главе 2 отдельное внимание уделено клиноформным и контуритным фациям как наиболее важным для изучения геологической истории исследуемой территории.

В главе **3 - Сеймостратиграфия осадочного чехла Северо-Чукотского бассейна и сопредельных территорий** - описаны сеймокомплексы, выделенные в волновом поле. Всего выделяются 4 сеймокомплекса: (1) акустический фундамент, характеризующийся хаотической записью и отсутствием протяженных осей синфазности; (2) первый сеймокомплекс ССЧБ-1,

представленный толщей мало контрастных осадков слабо выраженных в волновом поле; (3) второй сейсмокомплекс ССЧБ-2 (нижний клиноформный комплекс), сложенный толщей с характерным клиноформным строением, свидетельствующим о проградации шельфовых фаций в сторону относительно глубоководной территории хребта Менделеева на севере; (4) третий сейсмокомплекс ССЧБ-3 (верхний клиноформный комплекс), также характеризующийся клиноформным строением, но отличающийся сложной структурой, с проградацией мелководных комплексов навстречу друг другу.

В подглаве 3.2 - **Обзор сеймостратиграфических схем Северо-Чукотского бассейна и сопредельных территорий** – рассмотрены основные стратиграфические схемы расчленения Северо-Чукотского осадочного бассейна, описанные в русскоязычной и зарубежной литературе [Hegewald, Jokat, 2013; Houseknecht, Bird, Schenk, 2009; Ilhan, Coakley, 2018; Nikishin et al., 2019; Дараган-Суцова и др., 2015; Кулемин, 2011; Петровская, Савишкина, 2014; Поселов и др., 2017; Скарятин и др., 2020; Шипелькевич, Бурлин, 2003]. Схемы имеют принципиальные различия по возрастной и событийной интерпретациям опорных отражающих горизонтов (Рис. 2). Наибольшие различия между схемами - в возрасте комплекса ССЧБ-1, который разными авторами датируется от позднекаменноугольного до раннемелового. В стратификации верхней части чехла также имеются различия, однако, в большинстве схем стратификация кайнозойской толщи достаточно близка.

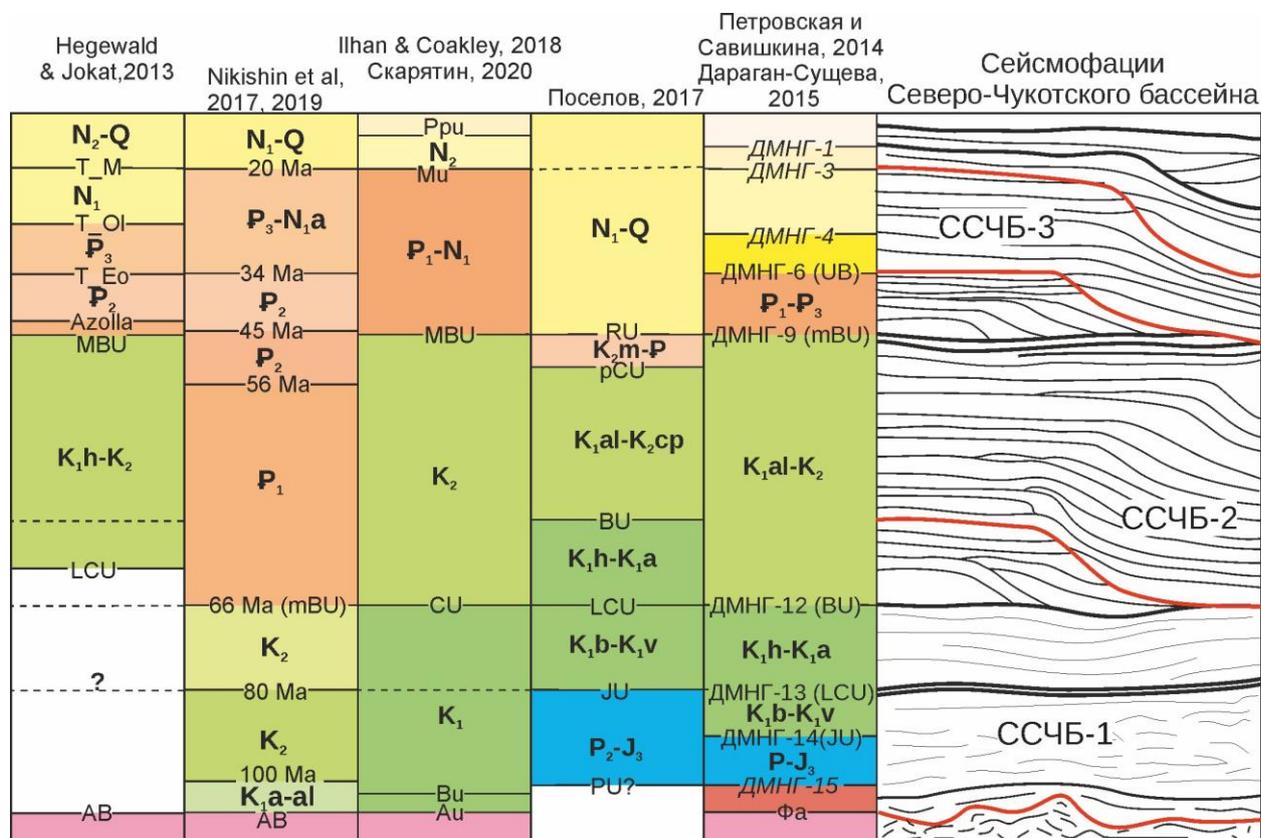


Рис. 2 Сопоставление основных схем стратификации Северо-Чукотского бассейна.

В следующем подразделе приведены основные источники информации о возрасте осадочного чеха региона. Из-за отсутствия скажинных данных для Северо-Чукотского бассейна для составления надежной схемы стратификации использовали широкий спектр данных. Для датировки отражающих горизонтов использовали: возраст линейных магнитных аномалий (ЛМА) Евразийского бассейна; стратиграфическую разбивку скважины АСЕХ, пробуренной в центральной части хребта Ломоносова; данные шельфовых скважин Аляски; данные скважины на острове Айон в акватории Восточно-Сибирского моря; возраст и положение базальтов магматической провинции HALIP; данные о геологической истории и фазах орогении для Новосибирских островов и острова Врангеля.

На основе вышеперечисленных данных на территории Северо-Чукотского бассейна и сопредельной с ним были выделены и продатированы следующие 7 отражающих горизонтов (Рис. 3):

1. **AB** – акустический фундамент. Данный горизонт выделяется по всей территории, он отделяет акустический фундамент, характеризующийся хаотической записью, от вышележащего стратифицированного осадочного чехла. Горизонт диахронный, но на подавляющей части Американо-Чукотского бассейна имеет аптский возраст, что подтверждается наличием базальтов HALIP в основании разреза.

2. **CU** (Cenomanian Unconformity) – сеноманское несогласие. Горизонт выделяется на границе рифтовых и пострифтовых комплексов Восточно-Сибирского моря. Он прослеживается на всей территории Северо-Чукотского бассейна и соответствует уровню сеноманского несогласия, датированного в скважинах американского сектора Чукотского моря.

3. **MBU** (Mid Brookian Unconformity) – среднебрукское несогласие. Горизонт прослеживается из американского сектора Чукотского моря и датируется в ряде шельфовых скважин. Горизонт соответствует фазе воздымания хребта Брукса на Аляске [Moore, Vox, 2016; O'Sullivan et al., 1997]. На территории Северо-Чукотского бассейна этот горизонт соответствует резко несогласной эрозионной границе с залеганием полого-складчатой толщи ниже него и субгоризонтальной - выше.

4. Горизонт **LU** (Lomonosov Unconformity) был выделен на хребте Ломоносова и в пределах краевых частей Евразийского бассейна. Оттуда он был прослежен по всей территории Американо-Чукотского бассейна. Согласно скважине АСЕХ, этот горизонт соответствует началу океанического спрединга в Евразийском бассейне и имеет возраст 56 млн лет.

5. Горизонт **HARS** (High Amplitude Reflector Sequence) прослеживается в кровле выдержанной пачки ярких отражений на большей части Арктического бассейна. В Евразийском бассейне горизонт выклинивается в непосредственной близости от ЛМА 21no, имеющей возраст

45.7 млн лет. В Северо-Чукотском бассейне горизонт LU отделяет нижележащий комплекс ССЧБ-2 от верхнего клиноформного комплекса ССЧБ-3.

6. Горизонт **ES** (Erosional Surface) выделен в пределах Северо-Чукотского бассейна. Он выражается в общей клиноформной толще явной эрозионной формой с фрагментарной эрозией более 250 м осадков. Горизонт может быть привязан к резкому падению уровня моря в конце рюпельского века (27.9 млн лет). В глубоководном Евразийском бассейне горизонт ES прослеживается по сейсмическим данным, хотя и не имеет характерных особенностей. Горизонт выклинивается в интервале между ЛМА 13ny (33.16 млн лет) и 6ny (19.7 млн лет).

7. Горизонт **UBH** (Upper Bright Horison) выделяется на сейсмических данных как яркое отражение внутри акустически-прозрачной толщи осадков. При прослеживании вглубь бассейна на его уровне наблюдаются многочисленные формы некомпенсированного осадконакопления и контуритные тела. Горизонт предположительно соответствует началу активной циркуляции водных масс в Северном Ледовитом Океане (СЛО) и соответствует концу раннего миоцена (18.2 млн лет). Однако, его датировка остается дискуссионной, при рассмотрении в качестве основной другой модели стратификации скважины АСЕХ, возраст этого горизонта может быть изменен на 33.6 млн лет с соответствующим пересмотром нижележащей границы ES.

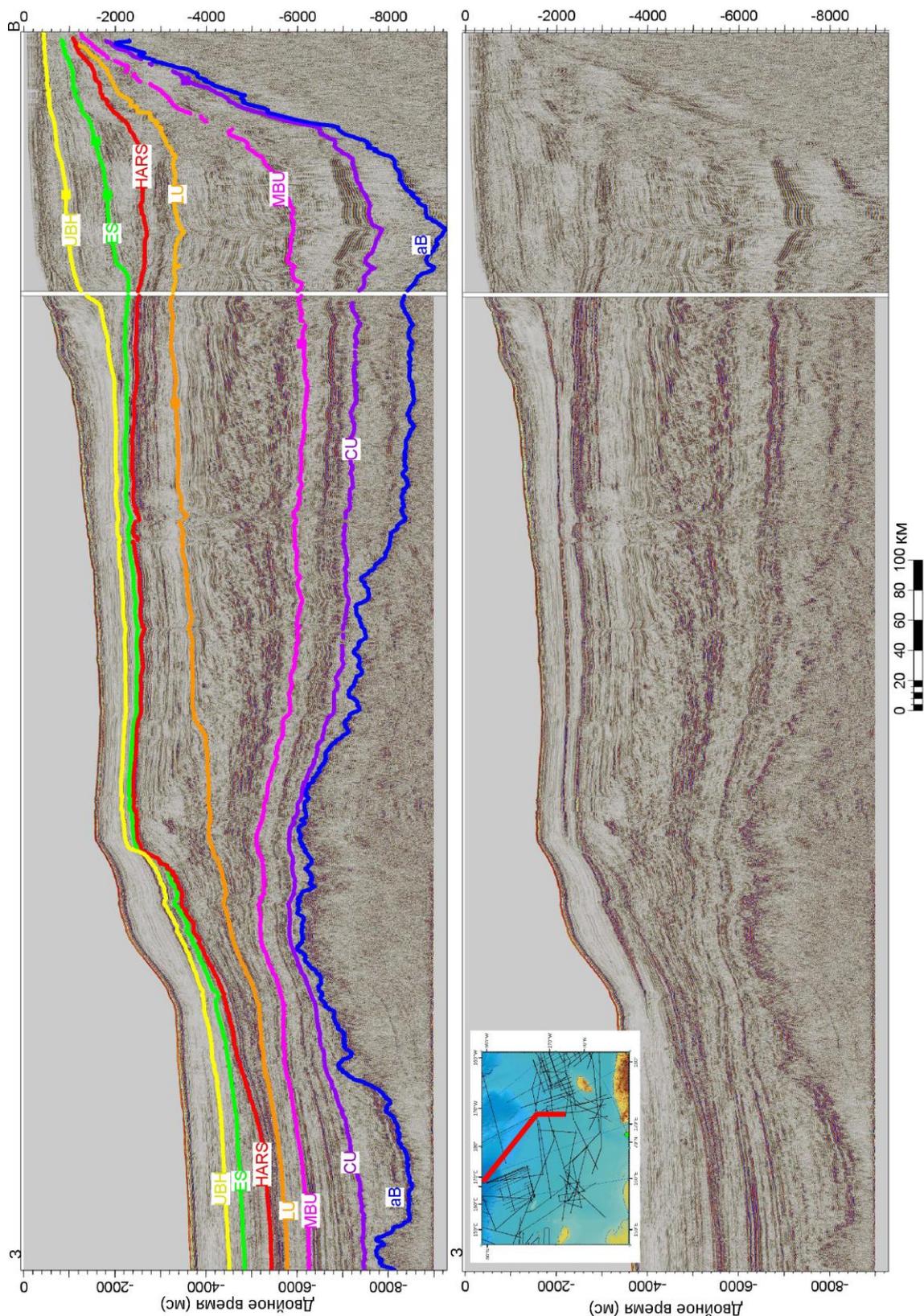


Рис. 3 Композитный профиль ION 11_4400 и ARC 14_01. Итоговая сеймостратиграфическая модель осадочного чехла Северо-Чукотского бассейна.

В главе 4 - **Кайнозойские клиноформные комплексы Северо-Чукотского бассейна** - приводятся результаты интерпретации клиноформного комплекса бассейна и полученные выводы об истории геологического развития бассейна в позднем мелу - кайнозое. В позднем мелу

(?) - палеоцене в Северо-Чукотском бассейне происходило накопление мощных осадочных толщ клиноформного типа, а территория поднятия Менделеева представляла собой глубоководный бассейн с глубиной не менее 2 км. Мощная клиноформная пачка осадков на данный момент слагает современную глубоководную террасу Кучерова (Рис. 4), бровке террасы представляет собой погруженный край древнего шельфа. В среднем эоцене произошла резкая перестройка региона, а затем последовал значительный трансгрессивный этап с отступанием бровки шельфа на 300-350 км на юг. Причина таких изменений дискуссионна, она может быть как эвстатической (изоляция Арктики на уровне события Azolla), так и тектонической (прогибание территории СЧБ одновременно с воздыманием хребта Брукса).

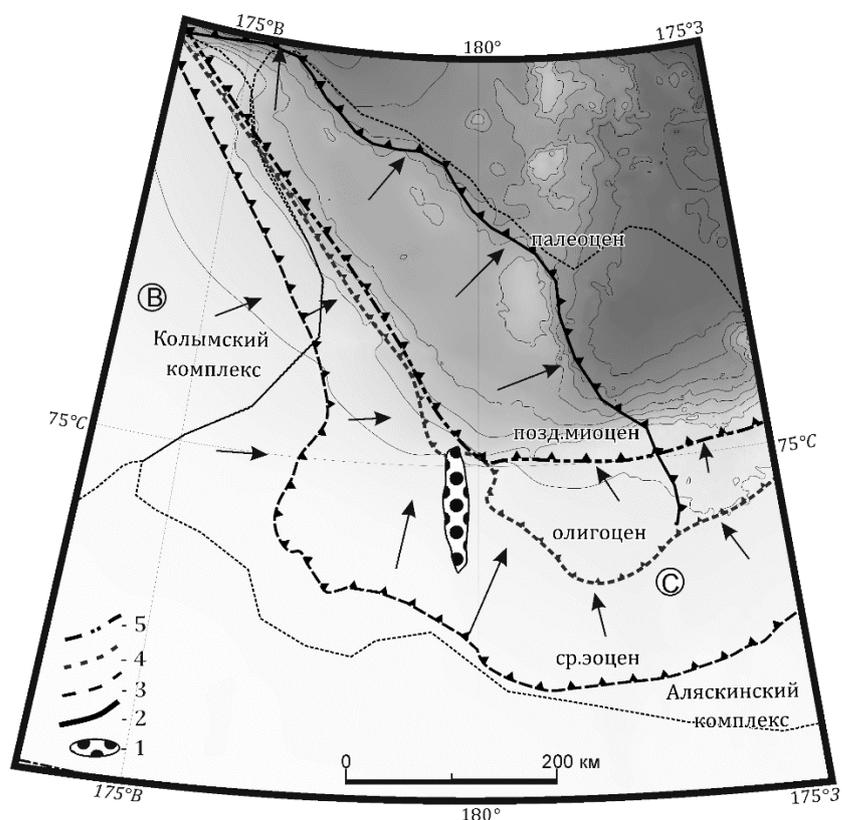


Рис. 4 Кайнозойская история развития шельфа Северо-Чукотского бассейна. 1- долгоживущая система каналов; 2-5 - положение бровки шельфа для различного времени: 2- палеоцен, 3 - ранний эоцен, 4 - олигоцен, 5 - поздний миоцен. Буквами обозначены: С – Северо-Чукотский бассейн, В – Восточно-Сибирский бассейн.

В среднеэоценовое - олигоценовое время бассейн имел глубину около 200 м в северо-западной части и около 400 м - в северо-восточной. Заполнение бассейна происходило с двух сторон, но неравномерно из-за палеобатиметрических особенностей. Предположительно в раннем олигоцене произошло резкое падение уровня моря, соответствующее рюпельскому событию падения уровня моря. В позднем миоцене бассейн приобрел современный облик с положением бровки шельфа очень близко к современному.

В главе 5 - **Контуритные фации глубоководной части СЛО по сейсморазведочным данным** – разобрана выделенная в сопредельной с Северо-Чукотским бассейном глубоководной части акватории серия осадочных структур – контуритов, образование которых неразрывно связано с глубоководными контурными течениями. Были выделены: погребенный обособленный дрейф в котловине Макарова; контурный канал в центральной части хребта Менделеева; контуриты в южной части хребта Ломоносова; ряд эрозионных структур в котловине Амундсена. Все выделенные структуры имеют следующие общие черты:

- начинают формироваться выше горизонта УВН,
- подстилаются отложениями субпараллельной сейсмофации,
- имеют внутреннее строение типичное для контуритов (холмовидный облик, наличие моата, эрозионные поверхности внутри и в основании пачки).

Единственной известной на данный момент причиной изменения характера глубоководной циркуляции воды в СЛО является открытие пролива Фрама. Считается, что в определенный период своей истории СЛО был изолирован от мирового океана, по крайней мере на глубоководном уровне. Затем, вследствие тектонических причин произошло формирование пролива Фрама, через который началось поступление вод из мирового океана в СЛО и заложение глубоководных контурных течений в последнем [Engen, Faleide, Dyreng, 2008; Jakobsson et al., 2007a].

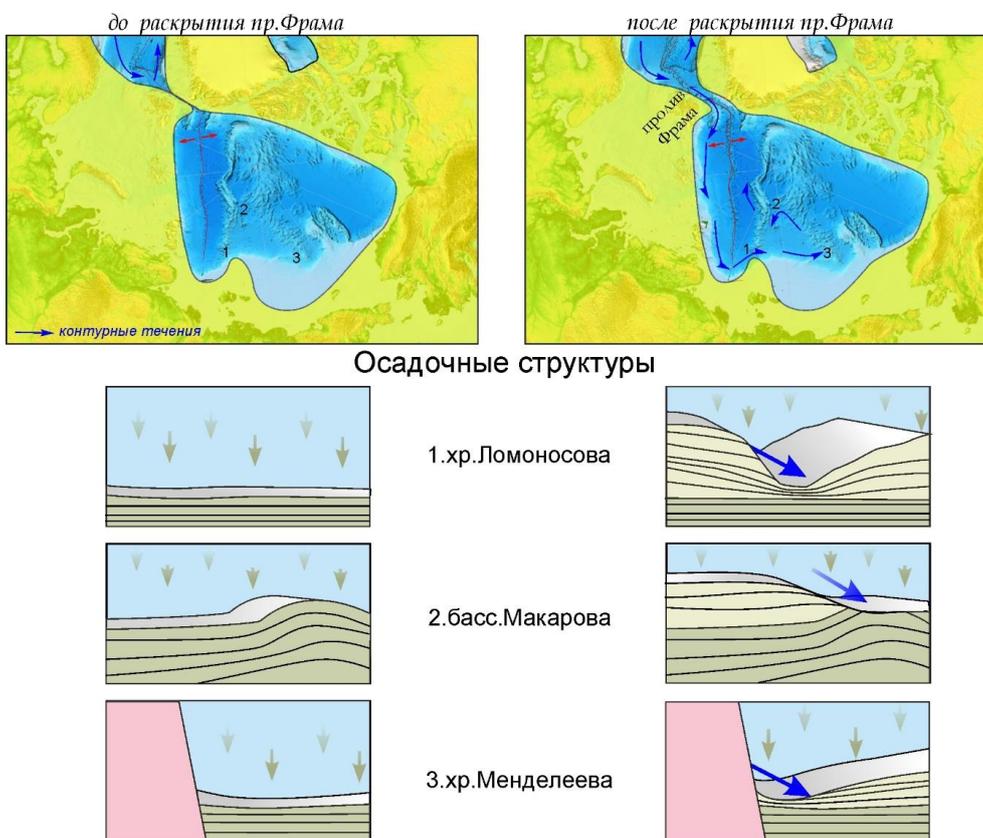


Рис. 5 Изменение глубоководной циркуляции Арктического бассейна после открытия пролива Фрама, и отражение этого момента в осадочных структурах.

Датировка открытия пролива Фрама существенно различается в зависимости от принятой модели возрастной разбивки скважины АСЕХ. Разными авторами это событие датируется от 36.2 до 18.2 млн лет. По сейсморазведочным данным не представляется возможным подтвердить или опровергнуть ту или иную модель. В тоже время, имеющихся данных достаточно для уверенной корреляции эрозионного события на уровне горизонта UBH в различных районах Амеразийского бассейна, выделения контуритов выше него, и сопоставления данного события с литологической пачкой 1/5 в скважине АСЕХ. Основным результатом диссертационной работы является вывод о старте глубоководной циркуляции в момент открытия пролива Фрама не только в Евразийской части СЛО, но и в Амеразийском бассейне, безотносительно конкретного времени этого события (Рис. 5). Данный вывод также позволяет говорить о том, что в момент открытия пролива Фрама хребет Ломоносова был достаточно погружен и не препятствовал прохождению глубоководных масс из Евразийского бассейна в Амеразийский.

Глава 6 - Аптская-альбская тектоническая история Северо-Чукотского бассейна и прилегающей шельфовой территории – посвящена построению тектонической модели. В начале главы описаны основные существующие на данный момент схемы тектонического развития региона [Chernykh et al., 2018; Døssing et al., 2020; Grantz et al., 1998; Herron, Dewey, Pitman, 1974; Miller et al., 2018; Petrov et al., 2016; Кулаков и др., 2013; Лаверов и др., 2013; Лобковский, 2016; Пущаровский, 1976]. Для построения плит-тектонической модели использовали геофизические данные и данные научной литературы. На основе этих данных вся территория Восточно-Сибирского шельфа Северного Ледовитого океана была разделена на 20 блоков с различной тектонической историей в мезозой - кайнозойское время. Было выделено два типа блоков – мезо-кайнозойские осадочные бассейны и относительно не растянутые блоки фундамента. Все блоки отделены друг от друга региональными разломами и могут смещаться один относительно другого. Осадочные бассейны характеризуются утоненной корой и толстым осадочным чехлом. В фундаменте каждого бассейна выделяются многочисленные рифты, которые указывают на этап растяжения в его геологической истории.

По геофизическим данным были определены масштаб, время и направление растяжения для каждого обособленного блока земной коры. На основе полученных значений была построена кинематическая модель. Возрастной интервал, в который происходило растяжение, определяли по тектоностратиграфической интерпретации сейсмических данных. Был прослежен горизонт СУ, который подразделяет осадки на синрифтовые и пострифтовые. Формирование синрифтовой толщи происходило непосредственно в момент растяжения и, таким образом, растяжение может быть датировано по возрасту ограничивающих её горизонтов. Направление растяжения было установлено по ориентировке основных разломов, лежащих в фундаменте каждого бассейна.

Степень растяжения была оценена по карте мощности коры ArcCRUST [Lebedeva-Ivanova и др., 2019]. Оценки базировались на предположении что средняя мощность нормальной континентальной коры около 41 км [Christensen, Mooney, 1995]. Далее в ПО GPlates была построена плит-тектоническая модель включающая все полученные количественные характеристики (Рис. 6).

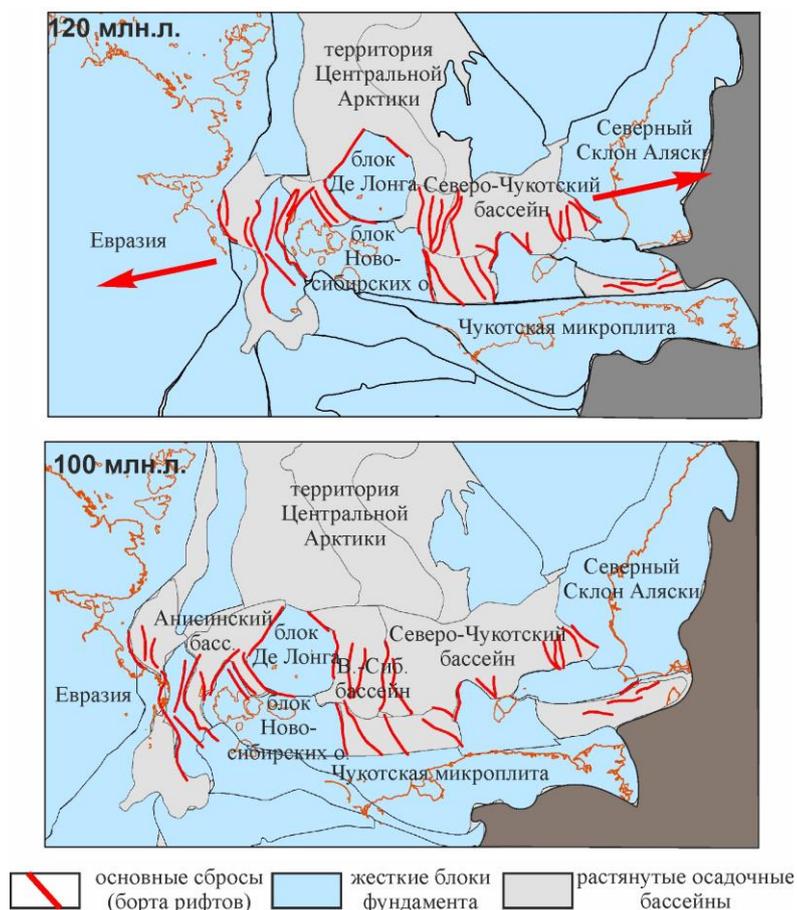


Рис. 6 Итоговая модель развития арктического шельфа Восточной Сибири в апт-альбское время.

В результате была выделена глобальная тектоническая стадия растяжения всего Восточно-Сибирского шельфа Северного-Ледовитого океана с временем начала около 120 млн лет и субширотным направлением. Суммарное растяжение всего шельфа составило 400-450 км. Выделенный этап синхронен событию формирования обширной магматической провинции HALIP (Рис. 7). Формирование таких провинций часто сопровождается региональным растяжением и рифтогенезом [Buiter, Torsvik, 2014]. В этом ключе модель выгодно отличается от ранее предложенных, которые или носили концептуальный характер и растяжение только предполагалось, или предсказывали отсутствие тектонических деформаций в апт-альбское время.



Рис. 7 Палеогеографическая карта Арктики для раннего апта (120 млн лет). 1 – области древних кратонов, 2 – мелководные бассейны, 3 – возвышенности, эродиремая суша, 4 – шельфовые бассейны с клиноформным некомпенсированным заполнением, 5- аллювиальные равнины, 6 – мелководно-морские обстановки, 7- глубоководные бассейны, 8 – базальты HALIP, 9 – области пост-орогенного вулканизма, 10 – окраинно-континентальные вулканические пояса, 11 – области континентального рифтинга, 12 – аккреционные пояса (составлено - Никишин А.М., Фрейман С.И.).

В главе 7 - **Среднеэоценовый этап тектонической истории региона** - описывается методика расшифровки и результаты интерпретации среднеэоценового этапа тектонической истории. В начале главы дается обзор основных тектонических событий региона в среднем эоцене. В рамках диссертационной работы в среднеэоценовых отложениях Северо-Чукотского и Восточно-Сибирского бассейнов было выделено большое количество малоамплитудных разрывных нарушений, затухающих приблизительно на одном уровне. С помощью статистического анализа видимых углов падения разломов на 2D сейсморазведочных данных разных ориентировок были определены средние ориентировки выявленных разрывных нарушений. Была выделена система нарушений с азимутом простирания (Аз. Пр.) 351° и средним углом падения 48° . Предполагается также наличие субвертикальных сбросов с Аз. Пр. лежащим между 40° и 110° , но для однозначного выделения этой системы недостаточно данных. На основе полученных ориентировок был выделен среднеэоценовый этап растяжения в субмеридиональном направлении с возможным наличием дополнительной сдвиговой

компоненты (Рис. 8). Таким образом, среднеэоценовые обстановки были проинтерпретированы как трансензионные.



Рис. 8 Два региона с различными внутриплитными тектоническими режимами. Зона с транспрессионным режимом включает Баренцево-Карский шельф и Западную Сибирь. Зона с трансензионным режимом включает территорию Евразийского бассейна, хребтов Альфа-Менделеева, шельфа Восточной Сибири и Берингоморо-Охотский регион. Полученный эллипсоид деформаций для района исследования обозначен белым цветом (составлено Никишин А.М., Фрейман С.И.).

Заключение. В настоящей работе на основе интерпретации геофизических данных, скважинных данных и данных о геологическом строении побережья было проведено исследование геологической истории Северо-Чукотского бассейна и прилегающих к нему шельфовых и глубоководных территорий Амеразийского бассейна Северного Ледовитого океана. Была выполнена сейсмическая корреляция опорных отражающих горизонтов на обширной территории Амеразийского бассейна и проинтерпретировано внутреннее строение выделенных сейсмокомплексов, в результате были сделаны выводы об особенностях тектонической и осадочной истории региона (Рис. 9).

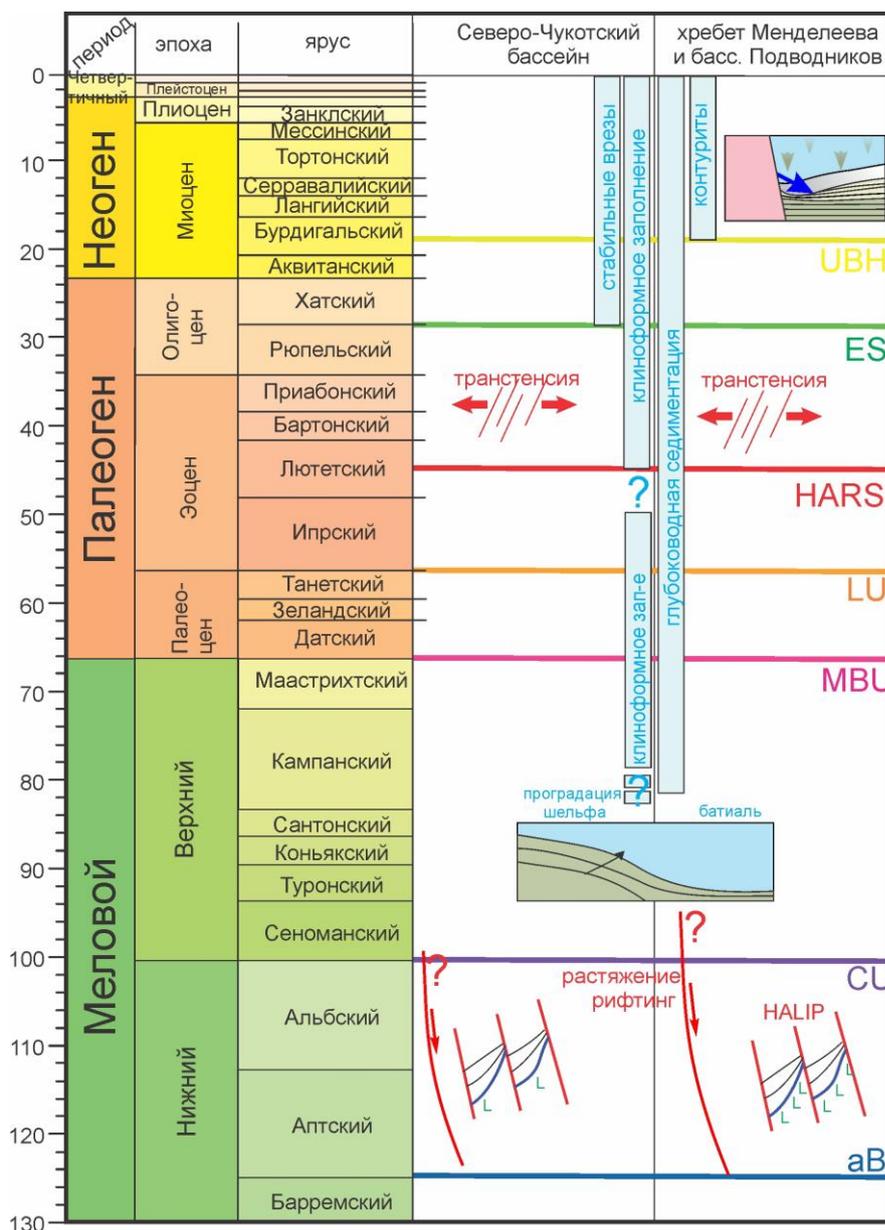


Рис. 9 . Итоговая хроностратиграфическая схема геологического развития Северо-Чукотского бассейна и сопредельной глубоководной территории (хребет Менделеева, бассейн Подводников). Стратиграфическая шкала по Gradstein, 2020.

Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы:

1. На основе сейсмостратиграфического анализа и анализа миграции бровки шельфа была описана история заполнения Северо-Чукотского бассейна осадочным материалом в кайнозойское время. Полученные данные представляют практическую значимость при поиске и разведке месторождений углеводородов, так как на их основе возможно построение уточненных фациальных карт и карт распространения терригенных коллекторов различного генезиса на площади Северо-Чукотского бассейна.

2. На основе региональной корреляции горизонтов и данных скважины АСЕХ в Американо-Чукотском бассейне были впервые проинтерпретированы осадочные структуры, сформированные под прямым воздействием глубоководных контурных течений. По

сейсмической корреляции начало формирования этих структур соответствует событию открытия пролива Фрама, установленному по данным скважины АСЕХ. Таким образом, можно говорить об установлении глубоководной циркуляции в Евразийском и Амеразийском бассейне одновременно. Возрастная привязка этого события обусловлена принятием той или иной модели стратиграфии скважины АСЕХ, и не может быть обоснована сейсмической корреляцией. Но по характеру распространения дрифтовых структур можно говорить об относительно глубоководном положении хребта Ломоносова в момент начала глубоководной циркуляции. Понимание схем циркуляции СЛО позволит в дальнейшем усовершенствовать климатические модели для данного временного интервала.

3. В аптское - альбское время произошла стадия растяжения всего арктического шельфа Восточной Сибири масштабом 400-450 километров. Впервые была проведена численная оценка масштабов растяжения и построена плит-тектоническая модель, включающая этот этап тектонического развития региона. Данная модель хорошо сочетается с формированием обширной магматической провинции HALIP в это же время. В ранее существовавших моделях формирование данной провинции происходило в условиях отсутствия каких-либо значимых тектонических событий. Полученная модель и оценка деформаций могут быть положены в основу бассейновой модели формирования чехла региона с последующим прогнозом углеводородного потенциала территории.

4. Впервые было оценено поле напряжений для большой серии малоамплитудных разломов, широко развитых в пределах шельфа Северо-Чукотского и Восточно-Сибирского осадочных бассейнов. На основе средних ориентировок систем среднеэоценовых разломов был выделен трансензионный этап с осью субширотного растяжения этой территории в целом. Полученные ориентировки делают возможным в будущем провести численное моделирование среднеэоценовой истории всего региона и оценить взаимосвязь среднеэоценовых тектонических перестроек, произошедших на большой территории от Тихого океана до о. Гренландия.

На данный момент основной проблемой изучения геологической истории арктического шельфа всей восточной Сибири и Северо-Чукотского бассейна в частности является отсутствие однозначной и общепринятой стратиграфической схемы расчленения осадочного чехла. Единственным возможным решением этой проблемы видится проведение стратиграфического бурения на шельфе или в глубоководной части, откуда возможно уверенное прослеживание отражающих горизонтов на территорию арктического шельфа восточной Сибири.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи, опубликованные в журналах Scopus, WOS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защит в диссертационном совете МГУ по специальности 25.00.01

Общая и региональная геология:

1. Жуков Н.Н., Никишин А.М., Петров Е.И., **Фрейман С.И.** Рифтовые системы Восточно-Сибирской континентальной окраины // Вестник Московского Университета. серия. 4. Геология. 2020. № 5. С. 3-16. Импакт-фактор по РИНЦ 0,736, (0.875 п.л. / авторский вклад 10%)

2. Никишин А.М., Старцева К.Ф., Вержбицкий В.Е., Клутинг С., Малышев Н.А., Петров Е.И., Посаментиер Х., **Фрейман С.И.**, Линева М.Д., Жуков Н.Н. Этапы тектонической эволюции и сейсмостратиграфия осадочных бассейнов Восточно-Сибирского и Чукотского морей и сопряженной части Американо-Азиатского бассейна // Геотектоника. 2019. №6 с.1-24 Импакт-фактор по WoS 0.746, (1.437 п.л., авторский вклад 20%).

3. **Фрейман С.И.**, Никишин А.М., Петров Е.И. Кайнозойские клиноформные комплексы и геологическая история Северо-Чукотского бассейна // Вестник Московского Университета. серия. 4. Геология. 2019. № 4. С. 11-19. Импакт-фактор по РИНЦ 0,736, (0.563 п.л., авторский вклад 90%).

4. *Nikishin, A. M., Gaina, C., Petrov, E. I., Malyshev, N. A., Freiman, S. I.* Eurasia Basin and Gakkel Ridge, Arctic Ocean: Crustal asymmetry, ultra-slow spreading and continental rifting revealed by new seismic data // Tectonophysics. 2018. Т. 746. С. 64–82. Импакт-фактор по WoS 3.048, (1.125 п.л., авторский вклад 25%)

5. *Nikishin A. M., Petrov, E. I., Cloetingh, S., Freiman, S. I., Malyshev, N. A., Morozov, A. F., Posamentier H.W., Verzhbitsky V.E., Zhukov N.N., Startseva, K. F.* Geological structure and history of the Arctic Ocean based on new geophysical data: Implications for paleoenvironment and paleoclimate. Part 2. Mesozoic to Cenozoic geological evolution // Earth-Science Reviews. – 2019. – С. 103034. Импакт фактор по WoS 9.724, 724 (7.125 п.л., авторский вклад 20%)

Иные публикации:

6. Никишин А.М., Петров Е.И., Гайна К., Малышев Н.А., **Фрейман С.И.** Тектонические реконструкции Арктического региона для позднеюрско-кайнозойского времени // Мат-лы :LI Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, – 2019 Т. 2. – С. 83-86 (0.23 п.л., авторский вклад 20%).

7. Никишин А.М., Петров Е.И., Гайна К., Малышев Н.А., **Фрейман С.И.** Новые геологические данные и модель тектонической истории Арктического океана // Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии // Мат-лы :L Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, – 2018 Т. 2. – С. 45-48 (0.23 п.л., авторский вклад 10%).

8. Никишин А.М., Малышев Н.А., Петров Е.И., Старцева К.Ф., Никишин А.М., Малышев Н.А., Петров Е.И., Старцева К.Ф., **Фрейман С.И.**, Родина Е.А. Типы современных пассивных континентальных окраин и проблема механизма формирования поднятия Альфа-Менделеева в Арктическом океане // *Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики* // Мат-лы :ЛП Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, – 2020 Т. 2, С. 116-121 (0.325 п.л., авторский вклад 10%).
9. Российская Арктика. Пространство. Время. Ресурсы.: Атлас/ ПАО НК «Роснефть» / Д. Н. Айбулатов, В. Л. Бабурин ... **С.И. Фрейман**, и др. — Фонд НИР ООО Феория Москва, 2019. — 796 с (50 п.л., авторский вклад 0.005%).
10. **Фрейман С.И.**, Посаментьер Х., Петров Е.И., Никишин А.М. Кайнозойские клиноформные комплексы Северо-Чукотского бассейна // *Тектоника современных и древних океанов и их окраин* // Мат-лы XLIX Тектонического совещания, посвященного 100-летию академика Ю.М. Пушаровского. – М.: ГЕОС, – 2017 Т. 2. – С. 261–265 (0.31 п.л., авторский вклад 95%).
11. **Фрейман С.И.**, Петров Е.И., Гайна К., Никишин А.М. Модель тектонического развития Арктического региона в апт-альбское время // *Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии* // Мат-лы :L Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, – 2018 Т. 2. – С. 292–295 (0.25 п.л., авторский вклад 90%).
12. **Фрейман С.И.**, Никишин А.М. Методика определения средней ориентировки нарушений по 2D сейсмическим данным и интерпретация тектонических обстановок на примере шельфа Восточной Арктики.// *Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики* // Мат-лы :ЛП Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, – 2020 Т. 2. – С. 364–367 (0.25 п.л., авторский вклад 95%).
13. Nikishin A., Gaina C., Petrov E., **Freiman S.** Seismic stratigraphy and tectonostratigraphy of the Arctic Ocean based on new Russian geophysical data // *Geophysical Research Abstracts*. – 2018. Vol. 20 – EGU2018-2200 (0.0625 п.л., авторский вклад 30%).
14. **Freiman S.**, Nikishin A., Petrov E. Seismostratigraphy and Cenozoic evolution of the North-Chukchi basin and adjacent Arctic areas // *Geophysical Research Abstracts*. – 2017. Vol. 19 – EGU2017-2577 (0.0625 п.л., авторский вклад 95%).
15. **Freiman S.**, Nikishin A., Gaina C., Petrov E. Cretaceous plate tectonic model of Russian Arctic shelf // *Geophysical Research Abstracts*. – 2018. Vol. 20 – EGU2018-7589 (0.0625 п.л., авторский вклад 95%).
16. **Freiman S.**, Nikishin A., Petrov E. Onset of deep-water circulation in Eastern Arctic area// *Geophysical Research Abstracts*. – 2019. Vol. 21 – EGU2019-7098 (0.0625 п.л., авторский вклад 95%).