

КАНАДСКИЙ БАССЕЙН АРКТИЧЕСКОГО ОКЕАНА: МОДЕЛИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ, ИСТОРИИ И ГЕОДИНАМИКИ ФОРМИРОВАНИЯ

Анатолий Михайлович Никишин¹✉, Ксения Федоровна Алёшина²,
Елизавета Андреевна Родина³, Ирина Михайловна Артемьева⁴,
Джиллиан Роуз Фулджер⁵, Хенри Уильям Посаментьер⁶

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; amnikishin@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0002-5375-6237>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kfstartseva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6261-4110>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; rodina_liza@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3381-7326>

⁴ Центр океанических исследований имени Гельмгольца GEOMAR, Киль, Германия; iartemieva@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-3207-2901>

⁵ Университет Дарема, Дарем, Великобритания; gillian.foulger@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6943-6214>

⁶ Консультант, Калифорния, США; hposamen1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6891-631X>

Аннотация. В Арктическом океане выделяются Амеразийский и Евразийский бассейны. Они разделены хребтом Ломоносова. В южной части Амеразийского бассейна расположен Канадский бассейн с меловой океанической и переходной корой. Севернее Канадского бассейна выделяется поднятие Альфа-Менделеева и сопряженные с ним глубоководные бассейны (Подводников, Макарова, Толля, Наутилус и Стефанссона). Поднятие Альфа-Менделеева и сопряженные бассейны имеют в разной степени измененную континентальную кору, и их главная эпоха формирования была около 125–90 млн лет назад (Ма). Обсуждается три модели формирования Канадского бассейна. Модель-1: сначала сформировался весь Амеразийский бассейн с океанической и переходной корой (до 125 Ма), потом формировалась область поднятия Альфа-Менделеева как вулканическое образование на более ранней океанической коре (125–90 Ма). Модель-2: сначала сформировался Канадский бассейн (до 125 Ма), потом формировалась область поднятия Альфа-Менделеева и сопряженные бассейны как область значительного растяжения континентальной коры и магматизма (125–90 Ма). Модель-3: сначала над областью мантийного плюма сформировалась область поднятия Альфа-Менделеева и сопряженные бассейны (125–100 Ма), а затем по одной из ветвей континентального рифтинга начался спрединг переходной и океанической коры и образовался Канадский бассейн (100–70 Ма). Модель-1 наименее вероятна, так как сейчас доказано, что для поднятия Альфа-Менделеева характерна континентальная кора. Модели 2 и 3 могут рассматриваться как вероятные. По этим моделям Канадский бассейн формировался как задуговой бассейн Тихоокеанской зоны субдукции.

Ключевые слова: Арктика, Канадский бассейн, поднятие Альфа-Менделеева, задуговой бассейн, строение коры, сейсмостратиграфия, магматизм

Для цитирования: Никишин А.М., Алёшина К.Ф., Родина Е.А., Артемьева И.М., Фулджер Дж.Р., Посаментьер Х.У. Канадский бассейн Арктического океана: модели геологического строения, истории и геодинамики формирования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 5. С. 3–22.

CANADA BASIN (ARCTIC OCEAN): MODELS OF GEOLOGIC STRUCTURE, HISTORY AND GEODYNAMICS OF FORMATION

Anatoly M. Nikishin¹✉, Kseniya F. Aleshina², Elizaveta A. Rodina³,
Irina M. Artemeva⁴, Gillian R. Foulger⁵, Henry W. Posamentier⁶

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; amnikishin@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0002-5375-6237>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kfstartseva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6261-4110>

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; rodina_liza@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3381-7326>

⁴ GEOMAR Helmholtz Center for Ocean Research, Kiel, Germany; iartemieva@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-3207-2901>

⁵ Durham University, Dept. Earth Sciences, Durham, U.K.; gillian.foulger@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6943-6214>

⁶ Consultant, CA, USA; hposamen1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6891-631X>

Abstract. In the Arctic Ocean, the Amerasia and Eurasia basins are recognized. They are separated by the Lomonosov Ridge. In the southern part of the Amerasia Basin is the Canada Basin with Cretaceous oceanic and transitional crust. The Alpha-Mendelev Rise and its associated deep-water basins (Podvodnikov, Makarov, Toll, Nautilus, and Stefansson) lie to the north of the Canada Basin. The Alpha-Mendelev Rise and associated basins

contain varying amounts of altered continental crust. Their major construction period was about 125–90 Ma. We discuss three models for formation of the Canadian Basin. Model-1: the entire Amerasia Basin with oceanic and transitional crust was formed first (before 125 Ma). This was followed by the Alpha-Mendeleev Rise region which formed as a volcanic formation on earlier oceanic crust (125–90 Ma). Model-2: the Canada Basin formed first (before 125 Ma). The Alpha-Mendeleev Rise region and associated basin then formed via continental crustal extension and magmatism (125–90 Ma). Model-3: the Alpha-Mendeleev uplift region and associated basins formed above a mantle plume (125–100 Ma). Subsequently, along one of the branches of continental rifting, spreading formed transitional and oceanic crust and the Canada Basin was formed (100–70 Ma). We find Model-1 to be the least probable, since it is now proven that the Alpha-Mendeleev Rise is underlain by continental crust. Models-2 and -3 are both possible. According to these models, the Canada Basin formed as a back-arc basin of the Pacific subduction zone.

Keywords: Arctic, Canada Basin, Alpha-Mendeleev Rise, backarc basin, crustal structure, seismic stratigraphy, magmatism

For citation: Nikishin A.M., Aleshina K.F., Rodina E.A., Artemeva I.M., Foulger G.R., Posamentier H.W. Canada Basin (Arctic Ocean): models of geologic structure, history and geodynamics of formation. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 5: 3–22. (In Russ.).

Введение. В Арктическом (Северном Ледовитом) океане традиционно выделяется два глубоководных бассейна, которые разделены подводным хребтом Ломоносова. Это бассейны Евразийский и Амеразийский (рис. 1). В Амеразийском бассейне отдельно выделяется Канадский бассейн. К северу от Канадского бассейна известна область подводного поднятия Альфа-Менделеева и сопряженные с ней относительно глубоководные бассейны Подводников, Макарова, Толля, Наутилус и Стефанссона. Эту область мы назвали Северо-Амеразийским доменом [Nikishin et al., 2014; 2021a; 2021b; 2021c]. Четкой батиметрической границы между Канадским бассейном (Южно-Амеразийским доменом) и Северо-

Амеразийским доменом нет. Глубина Канадского бассейна достигает 3,7–3,8 км.

Область Амеразийского бассейна изучается давно. Классический синтез всех геологических знаний про этот бассейн был сделан в серии публикаций Артура Гранца и его соавторов [Grant et al., 2011]. В этих работах было сформулировано два основных вывода. 1. Весь Амеразийский бассейн подстилается условно океанической корой; при этом в периферической части кора имеет состав серпентизированных перидотитов (или состав какой-то переходной коры), и она формировалась примерно 195–131 млн лет назад (для областей с этой корой не характерны линейные магнитные аномалии). В осевой части

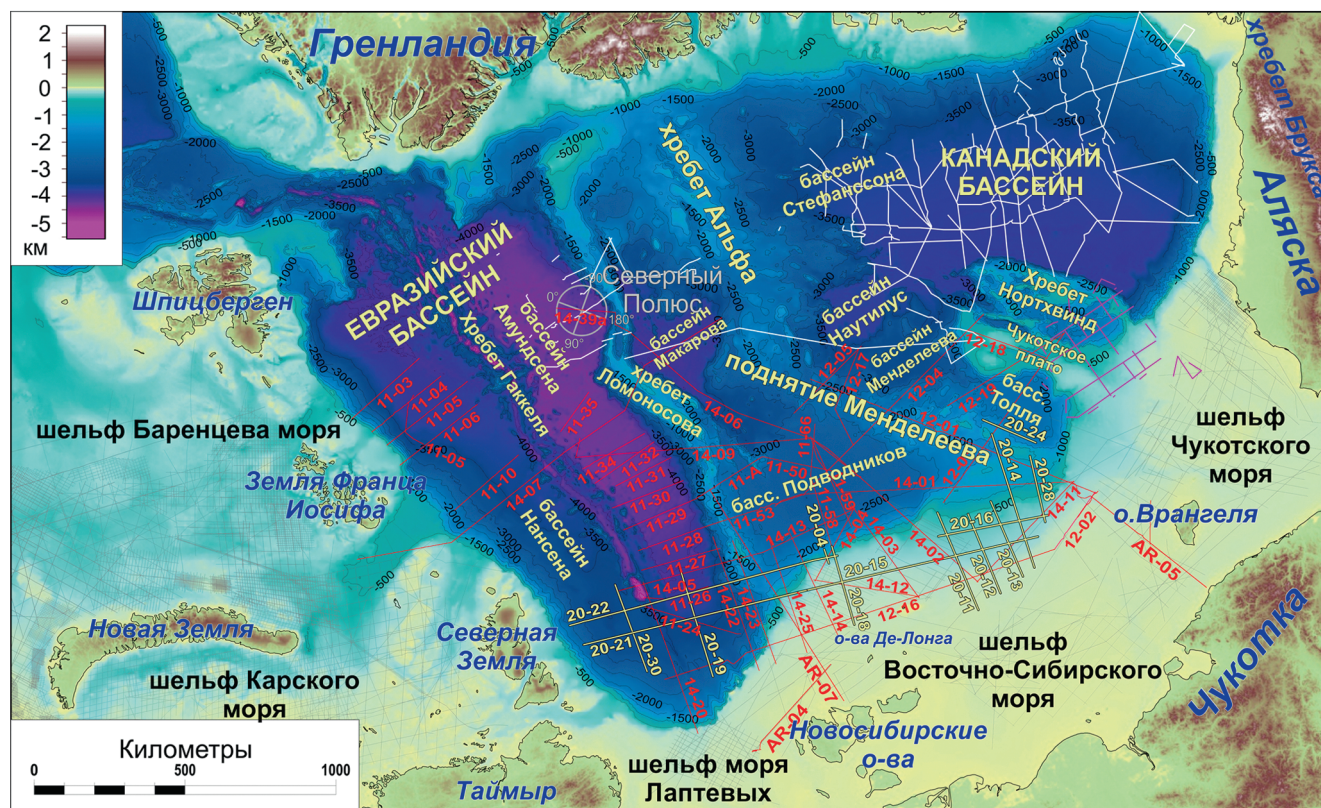


Рис. 1. Топография и батиметрия Арктического региона [Jakobsson et al., 2020]. Красные линии показывают сейсмические профили, полученные в ходе экспедиций Арктика–2011, Арктика–2012, Арктика–2014. Желтые линии — сейсмические профили экспедиции Арктика–2020. Белые линии показывают сейсмические профили, представленные Геологической службой Канады [Shimeld et al., 2021]

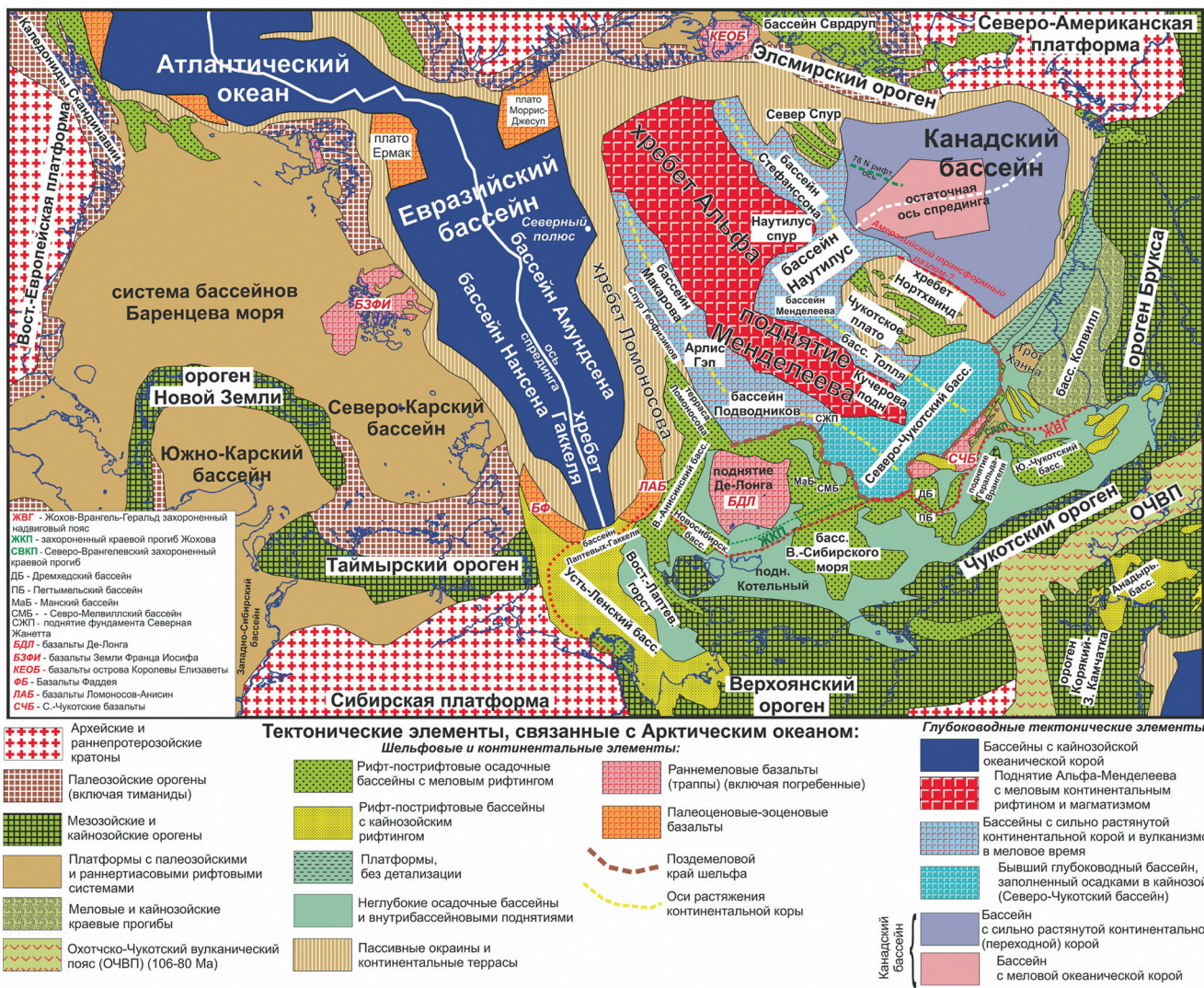


Рис. 2. Тектоническая схема Арктического региона. Основана на работах [Nikishin et al., 2021a, 2021b, 2022] и новых данных. Структура Канадского бассейна показана по данным в [Mosher et al., 2023; Chian et al., 2016]. Географической основой является геологическая карта Арктики [Harrison et al., 2011]

имеется типичная океаническая кора и она характеризуется линейными магнитными аномалиями; эта кора формировалась примерно 131–126 млн лет назад. 2. Район Амеразийского бассейна в Северо-Амеразийском домене был перекрыт вулканическим комплексом базальтового плато Альфа-Менделеева около 127–75 млн лет назад.

Примерно с 2010 г. интенсивность геолого-геофизического изучения резко возросла. Это во многом было связано с новой Конвенцией ООН по морскому праву. В России, США, Канаде, Дании, Германии и Китае были организованы специальные экспедиции и к настоящему времени получено очень много новой информации, которая позволяет уточнить или пересмотреть концепцию А. Гранца по истории Амеразийского бассейна. В последние годы появилось много публикаций с разными моделями времени и геодинамики формирования Канадского бассейна [Shephard et al., 2013; Chernykh et al., 2018; Miller et al., 2018; Mukasa et al., 2020; Hutchinson et al., 2024].

Данная работа во многом является обзором имеющихся данных и выводов. Перед нами стоит два основных вопроса. Первый — время и геодинамика формирования Канадского бассейна. Второй — соотношения Канадского бассейна и крупной магматической области Альфа-Менделеева. Магматическая область Альфа-Менделеева обычно рассматривается как часть High Arctic Large Igneous Province (HALIP) (крупная магматическая провинция Высокой Арктики) [Dobretsov et al., 2013; Oakey, Saltus, 2016].

Краткий региональный геологический обзор. Геологическое строение данного региона было охарактеризовано нами ранее [Nikishin et al., 2021a, 2021b, 2021c; 2022; 2023]. Современные обзоры приведены в [Piskarev et al., 2019; Petrov, Smelror, 2021; Mosher et al., 2023; Hutchinson et al., 2024; Черных и др., 2023]. На рис. 2 показана тектоническая схема района Амеразийского бассейна. В состав Амеразийского бассейна входят отдельно Канадский бассейн и область Северо-Амеразийского домена или система Альфа-Менделеева. В систему Альфа-Менделеева

входит само поднятие Альфа-Менделеева и система его сопряженных глубоководных бассейнов: пояс бассейнов Подводников и Макарова и пояс бассейнов Толля-Наутилус-Стефанссона. К системе Альфа-Менделеева мы также относим подводные поднятия Чукотского Бордерленда (Чукотское плато и хребет Нортхвинд) и Север Спур (Отрог Север). Северо-Чукотский бассейн также рассматривается как часть системы Альфа-Менделеева. Сейчас это шельфовый бассейн, ранее он, как и бассейн Подводников, был относительно глубоководным, но в позднем мелу-кайнозое эта депрессия была заполнена осадками.

В систему Альфа-Менделеева (или Северо-Американский домен) входит поднятие Альфа-Менделеева. Это поднятие Альфа-Менделеева нами недавно охарактеризовано со ссылками на многие публикации [Nikishin et al., 2021a, 2021b, 2021c; 2022; 2023; Никишин и др., 2023; Rodina et al., 2022]. Современные данные также приведены в [Skolotnev et al., 2019; 2022; 2023; Oakey, Saltus, 2016; Kashubin et al., 2018]. Сейчас преобладает концепция, что поднятие Альфа-Менделеева имеет континентальную кору толщиной около 25–30 км. Само поднятие имеет систему поднятий и полуграбен. Для относительных поднятий датированы вулканические комплексы с составами от базальтов до трахибазальтов и трахиандезитов. Возраст магматизма изотопными методами датирован как 125–100 Ma [Морозов и др., 2013; Skolotnev et al., 2023; Nikishin et al., 2021a] со статистическим пиком около 115–110 Ma [Skolotnev et al., 2023]. Для полуграбенов типичны сейсмические комплексы типа SDR (seaward dipping reflectors), которые обычно бывают образованы базальтовыми покровами и силлами. Обычно лавы SDR комплексов несколько моложе лав плато. Поэтому мы предполагаем, что возраст магматизма в полуграбенах около 110–100 Ma. Под вулканитами на относительных поднятиях были взяты пробы палеозойских осадков с возрастными от ордовика до девона. Эти комплексы интродуцированы магматическими породами примерно того же возраста, что и лавы [Skolotnev et al., 2022; 2023]. Для низов континентальной коры характерны относительно повышенные сейсмические скорости. Предполагается, что в основании коры имеется высокоскоростной слой в значительной степени образованный интрузиями базальтового состава (магматический андерплейтинг) [Oakey, Saltus, 2016; Kashubin et al., 2018; Lebedeva-Ivanova et al., 2019; Nikishin et al., 2023]. Модель строения коры поднятия Альфа-Менделеева представлена в [Никишин и др., 2023]. Мы показываем, что континентальная кора на 20–30% насыщена интрузиями базальтового состава.

На поднятии Альфа-Менделеева по сейсмическим данным также выделены меловые захороненные тела конической формы. Они интерпретируются как вероятные вулканы. Для такой подводной горы Федотов на хребте Альфа на основе изучения драгированных пород был получен возраст вулканитов (гиалокластитов) около 90 Ma [Funck, Shimeld, 2023].

Для пояса бассейнов Подводников и Макарова и пояса бассейнов Толля-Наутилус-Стефанссона предполагается наличие сильно утоненной гиперрастянутой континентальной коры, перекрытой раннемеловыми базальтами возрастными около 125–100 (90) Ma [Kashubin et al., 2018; Nikishin et al., 2023, Никишин и др., 2023]. При этом не исключено наличие частей бассейнов с локальной океанической корой [Lebedeva-Ivanova et al., 2019; Черных и др., 2023]. Для нижней части предполагаемого вулканического чехла данных бассейнов нами выделено две основных сейсмофации (два типа сейсмокомплексов) [Nikishin et al., 2023]: сейсмокомплексы типа seaward-dipping reflectors (SDR) и горизонтально залегающие вулканические комплексы (flat-lying flows по классификации [Geoffroy et al., 2022]). Комплексы типа SDR выделены на склонах бассейнов Подводников, Стефанссона и Толля. Они интерпретируются как крупные клинья базальтовых лав с какой-то долей осадков и с интрузиями силлов. Такого типа комплексы типичны для сильно растянутой континентальной коры на вулканических пассивных континентальных окраинах, например [Geoffroy et al., 2022]. Горизонтально залегающие вулканические комплексы (flat-lying flows) выделены в осевых частях бассейнов Стефанссона, Наутилус, Подводников и Макарова. Они интерпретируются как горизонтально залегающие комплексы базальтовых покровов на очень сильно растянутой континентальной коре [Geoffroy et al., 2022; Nikishin et al., 2023]. На уступах северного склона Чукотского Бордерленда (хребта Нортхвинд) (точка DR7) и у его подножья (точка DR6) были драгированы базальты [Mukasa et al., 2020]. Точка DR6 по нашей модели находится в пределах сейсмического комплекса «горизонтально залегающие вулканические комплексы (flat-lying flows)». Геохимическими и изотопными методами для базальтов показано, что среди них имеется две группы: низко-титанистые толеитовые базальты с возрастными 105–100 Ma и высоко-титанистые толеитовые базальты с возрастными около 90–70 Ma [Mukasa et al., 2020]. Показано, что базальты формировались при плавлении субконтинентальной литосферной мантии при подъеме астеносферного (плюмового) вещества [Mukasa et al., 2020]. Для точки DR7 (склон хребта Нортхвинд) изучены низко-титанистые толеитовые базальты с возрастными около 118–112 Ma, которые формировались при плавлении субконтинентальной литосферной мантии [Mukasa et al., 2020]. Геохимические и изотопные данные показывают, что бассейны типа Наутилус формировались при сильном растяжении континентальной коры (литосферы) без разрыва ее сплошности. Лавы с возрастными 105–100 Ma, вероятно, формировались синхронно с вулканитами SDR комплексов на поднятии Альфа-Менделеева.

Для бассейнов Стефанссона, Наутилус и Макарова выделено несколько вероятных крупных вулканических построек конической формы, которые

формировались в конце эпохи магматизма [Nikishin et al., 2021b; 2023; 2024; Rodina et al., 2022].

Чукотский Бордерленд (Чукотское плато и хребет Нортхвинд) всеми рассматривается как континентальный блок с корой тиманского и раннепалеозойского возрастов, например [Grantz et al., 2011; Brumley et al., 2015]. По интерпретации сейсмических профилей нами предположено, что вдоль западного и северо-западного краев Чукотского плато имеются области траппового магматизма раннемелового возраста (около 125–100 Ma) [Nikishin et al., 2023; 2024].

Север Спур (Отрог Север) находится на южном склоне бассейна Стефанссона возле Канадских островов и является континентальной террасой континентального склона [Hutchinson et al., 2017; Nikishin et al., 2023; Черных и др., 2023].

Канадский бассейн имеет четкий континентальный склон со стороны Аляски и Канадских островов (острова Банкс и Принс-Патрик). Граница с бассейнами Стефанссона и Наутилус в батиметрии отсутствует и является дискуссионной. Мы условно проводим северную границу Канадского бассейна по южным краям Чукотского Бордерленда и Север Спур (рис. 2). Современные сводки по геологии Канадского бассейна приведены в [Hutchinson et al., 2017; 2024; Mosher et al., 2023]. Ширина бассейна между континентальными склонами составляет примерно 1000–600 км. Длина бассейна вдоль его оси около 900 км.

Анализ аномалий гравитационного и магнитного полей проводился многими исследователями. Современные данные приведены в [Gaina et al., 2011; Saltus et al., 2011; Oakey, Saltus, 2016; Petrov et al., 2016; Chian et al., 2016; Piskarev et al., 2019; Zhang et al., 2019; Døssing et al., 2020; Mosher et al., 2023]. Новые данные подтверждают давно известную концепцию, например [Grantz et al., 2011], что для осевой части Канадского бассейна шириной до 340 км характерны линейные магнитные аномалии, которые не очень четко выражены. Для периферических частей бассейна магнитные аномалии имеют хаотичный вид без четкой линейности. По данным гравитационных аномалий в осевой части бассейна проходит четкая линейная отрицательная аномалия, которая всеми исследователями интерпретируется как меловая захороненная рифтовая долина спредингового хребта, например [Grantz et al., 2011; Døssing et al., 2020; Mosher et al., 2023; Черных и др., 2023].

Совместный анализ данных о сейсмических скоростях в коре и грави-магнитных аномалий показал, что для осевой части Канадского бассейна характерна стандартная океаническая кора. Для большей части периферических областей кора имеет другой состав и интерпретируется как переходная кора или сильно растянутая континентальная кора [Chian et al., 2016]. Переходная кора имеет два варианта интерпретации [Chain et al., 2026]: кора вулканических пассивных окраин с возможным

утоненным слоем континентальной коры и значительным магматическим андерплейтингом в низах коры; кора, в основном представленная веществом серпентинизированной мантии с фрагментами континентальных блоков.

Границу распространения стандартной океанической коры мы проводим по [Chian et al., 2016] с некоторыми изменениями для района моря Бофорта согласно [Døssing et al., 2020] (рис. 2).

Канадский бассейн имеет осадочный чехол толщиной до 8–10 км. Максимальные толщины осадков имеются в районах у континентальных окраин Аляски и Канады. В картах толщин осадков меловой срединно-океанический хребет не выражается [Dietrich et al., 2018; Hutchinson et al., 2024]. Для Канадского бассейна нет скважин и стратиграфия и сейсмостратиграфия пока носят условный характер. Традиционно выделяется три сейсмических горизонта: R10 (около 25–15 Ma, нижний миоцен), R30 (около 34 Ma, в конце эоцена) и R40 (около 55–60 Ma, в палеоцене) [Mosher et al., 2023; Hutchinson et al., 2024].

Несколько иная схема сейсмостратиграфии представлена Канадской геологической службой [Dietrich et al., 2018]. Их схема в значительной степени основана на изучении окраинно-континентального бассейна Бофорт-Маккензи. В краевых частях они выделяют синрифтовый комплекс (юра-нижний мел). В самом бассейне они выделяют пострифтовый комплекс. Он перекрывает, вероятно, весь бассейн. В пострифтовом комплексе ими выделены следующие границы: 1) граница мела и палеоцена, 2) граница в середине палеоцена, 3) граница в конце эоцена и 4) граница на рубеже миоцена и плиоцена. Из их интерпретации сейсмических профилей нет однозначного понимания того, перекрывает ли мела и палеоцена осевой меловой рифт ось спрединга или не перекрывает.

В работах с несколькими различными схемами сейсмостратиграфии Канадского бассейна [Mosher et al., 2023; Hutchinson et al., 2024; Dietrich et al., 2018] не сформулировано четкого ответа, как соотносятся сейсмостратиграфические комплексы собственно Канадского бассейна и бассейнов возле поднятия Альфа-Менделеева (бассейнов Наутилус, Стефанссона и склона поднятия Альфа-Менделеева).

Северо-восточная часть Канадского бассейна несколько южнее поднятия Север Спур осложнена поясом грабенов шириной до 75 км. Эти грабены хорошо выражены на сейсмических профилях. Они названы бассейном 78 градуса (78 N Basin) [Hutchinson et al., 2017] (см. рис. 2).

Данные и методы. В основе работы лежит обзор всех имеющихся геолого-геофизических данных для района Канадского бассейна. Дополнительно мы представим интерпретацию некоторых сейсмических профилей, которая покажет существующую неопределенность наших знаний.

Обоснование времени формирования Канадского бассейна. Модель 1. Время формирования

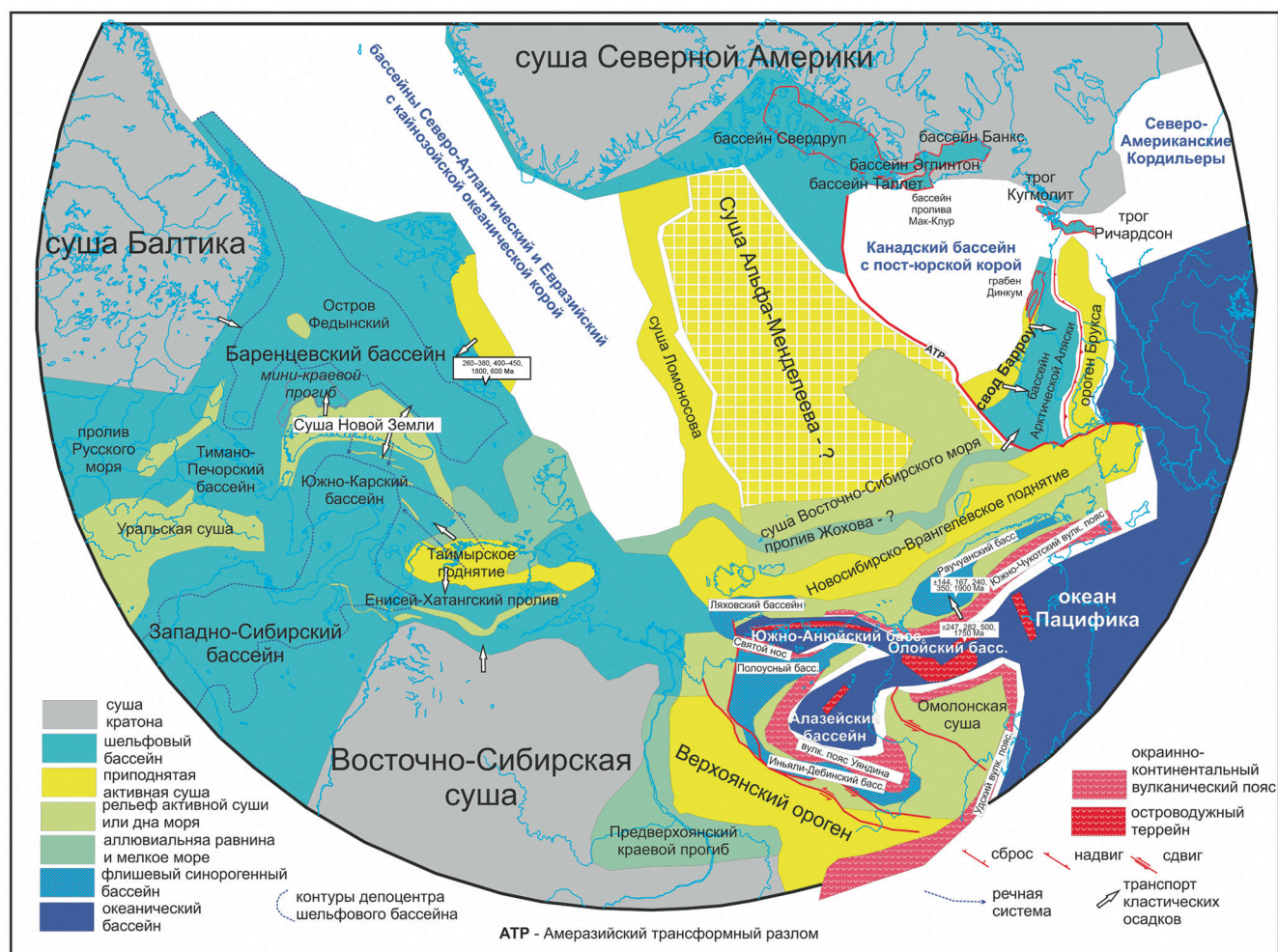


Рис. 3. Палеогеографическая карта для поздней юры (киммериджа-титона) на современной географической основе. Географическая основа — геологическая карта Арктики [Harrison et al., 2011]. Цифры в белых прямоугольниках — пики возрастов детритовых цирконов. По [Nikishin et al., 2021c], с изменениями

Канадского бассейна с разными вариантами предполагается как юра-мел. Под моделью-1 мы подразумеваем набор традиционных доказательств времени формирования Канадского бассейна. Наши построения базируются на серии палеотектонических реконструкций для поздней юры и раннего мела (рис. 3–8). В полосе континентальной окраины Канадского бассейна имеется система континентальных рифтов юрско-раннемелового возраста, например, [Grantz et al., 2011; Hutchinson et al., 2017; Nikishin et al., 2021c]. К ним относятся бассейны Свердруп, Таллет, Эглинтон, Банкс, Кугмолит, Ричардсон, Динкум. В классической геологии имеется вывод, что момент окончания континентального рифтинга на пассивной континентальной окраине соответствует началу спрединга океанической коры в океане. То есть граница рифт-пострифт (rift/postrift) является границей раскола литосферы (breakup unconformity). А. Гранц [Grantz et al., 2011] на основе изучения бассейна Северного Склона Аляски и бассейна Бофорт-Маккензи проводил эту границу внутри готерива (ранний мел). На Аляске в основании Pebble Shale unit (формация Галечных сланцев) (Lower Cretaceous Unconformity, LCU; нижнемеловое несогласие), а для

бассейна Бофорт-Маккензи в основании Mount Goodenough Formation (формации Маунт Гуденоу). Для бассейна Бофорт-Маккензи аналогично эта граница проводится и сейчас [Chen et al., 2024]. Для Аляски также и сейчас выделяется граница LCU с возрастом около готерива, например, [Houseknecht, 2019; Hutchinson et al., 2024]. Для бассейна Свердруп граница рифт-пострифт оценивается близко к границе валанжина и готерива [Hadlari et al., 2016]. Для Канадского бассейна по данным интерпретации сейсмических профилей в районе континентальной окраины моря Бофорта граница рифт-пострифт проведена на границе валанжина и готерива [Helwig et al., 2011]. Для Аляски LCU показывает важное событие. До этого времени, как минимум с триаса, транспорт обломочного материала шел со стороны современного Канадского бассейна, а после резко поменялась палеогеография и транспорт осадков был уже направлен в сторону глубоководного Канадского бассейна, например, [Houseknecht, 2019; Hutchinson et al., 2024]. Обобщение данных разных авторов показывает, что граница LCU (внутри готерива или на границе валанжина и готерива) с большой вероятностью является границей рифт-пострифт и границей



Рис. 4. Тектоническая реконструкция для поздней юры, киммериджа-титона (157–145 Ma). Кинематическая реконструкция для 150 Ma. Условные обозначения см. рис 3. Цифры в кружках: 1 — суша кратонов, 2 — шельфовые бассейны, 3 — приподнятая и тектонически активная суша, 4 — тектонически активная область на суше или на шельфе, 5 — аллювиальная равнина и мелководное море, 6 — флишевые синорогенные бассейны, 7 — окраинно-континентальные вулканические пояса, 8 — океанический бассейн, 9 — зона субдукции. АТР — Амеразийский трансформный разлом. Фиолетовые линии показывают очертания некоторых террейнов, даны их названия. По [Nikishin et al., 2021c], с изменениями

типа раскола литосферы (breakup unconformity) для района Канадского бассейна. Исходя из этого, время начала раскрытия Канадского бассейна оценено в 134 Ma [Helvig et al., 2011] или 133 Ma [Nikishin et al., 2021c]. Но этот вопрос дискуссионный и будет обсуждаться далее.

Хорошо известна концепция А. Эмбри [Embri, 2011] о палеоконтиненте Крокерленд в пределах Арктики. Им было показано, что севернее бассейна Свердруп с перми до середины юры существовала суша, с которой шел транспорт кластических осадков. Примерно с середины юры на месте современного Амеразийского бассейна появился водный бассейн.

Данные по бассейну Бофорт-Маккензи [Dixon et al., 2019; Chen et al., 2024] показывают, что Канадский водный (глубоководный-?) бассейн существовал определенно с позднего мела, а возможно и с баррема-альба. Многими стратиграфическими

и палеогеографическими работами обосновано, что Канадский бассейн как глубоководный бассейн точно существовал с брукского (Brookian) времени (с баррема(?)-апта) [Hutchinson et al., 2024].

Есть попытки определить возраст океанической коры Канадского бассейна по анализу линейных магнитных аномалий. Современные данные показывают вероятность того, что область Канадского бассейна с линейными аномалиями имеет возраст 139,5–128,6 Ma [Zhang et al., 2019]. Этот вопрос также обсуждается в [Døssing et al., 2020; Hutchinson et al., 2024]. Допускается, что возраст коры с линейными магнитными аномалиями составляет около 128–120 Ma. Все работы по определению возраста магнитных аномалий пока не являются однозначными. Но вероятность раннемелового возраста океанической коры высокая.

В большинстве работ обосновывается образование Канадского бассейна до вулканизма HALIP

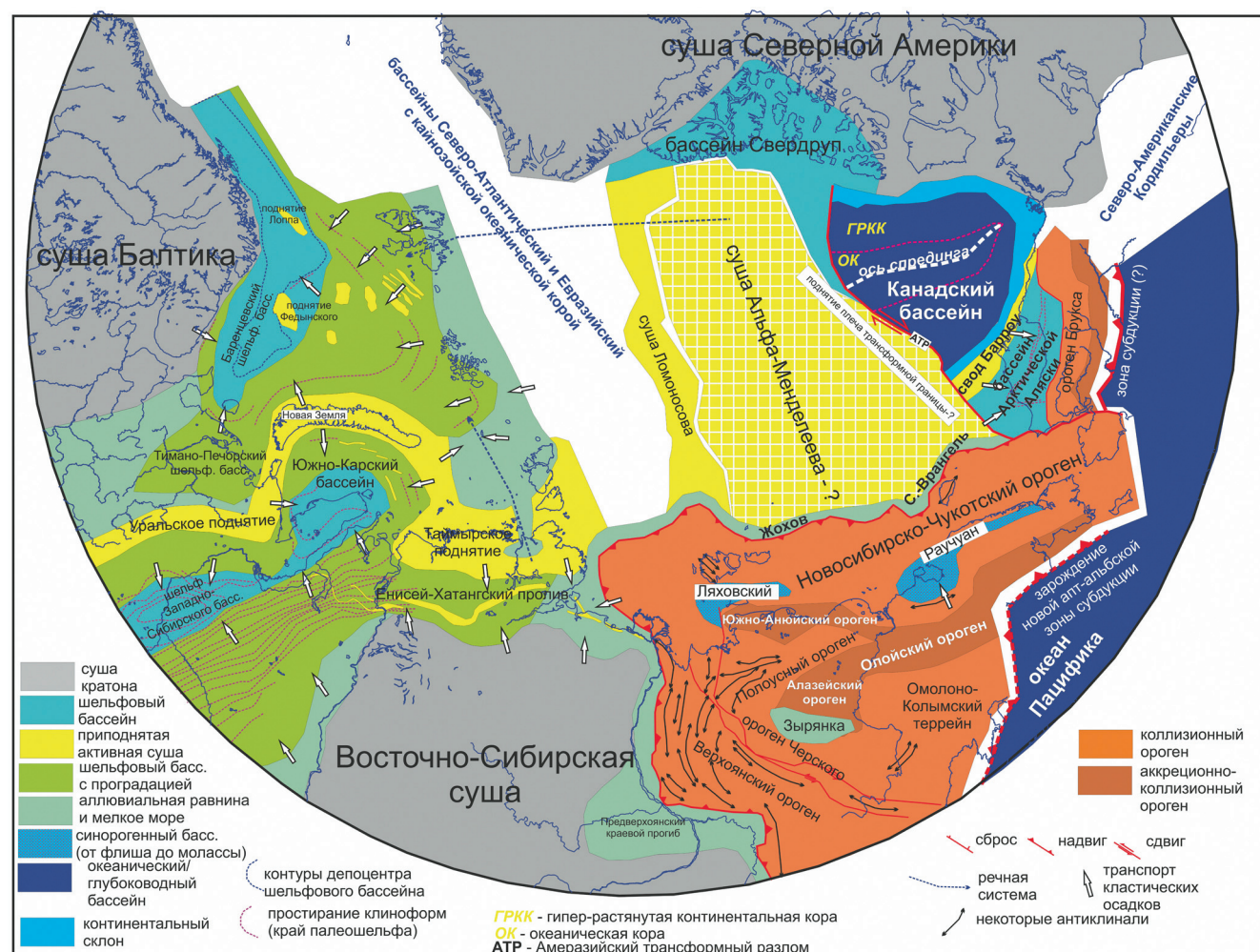


Рис. 5. Палеогеографическая карта для неокома (берриаса-баррема) на современной географической основе. Географическая основа — геологическая карта Арктики [Harrison et al., 2011]. По [Nikishin et al., 2021c], с изменениями

[Grantz et al., 2011; Døssing et al., 2020; Nikishin et al., 2021c], т. е. его раскрытие закончилось примерно до 125 Ma. Допускается вариант, что начало формирования Канадского бассейна было до вулканизма HALIP (фаза 1), а завершение — синхронно с HALIP [Hutchinson et al., 2017].

Мы обсуждали выше, что граница рифт-пострифт (rift/postrift) для бассейнов вокруг Канадского бассейна является границей раскола литосферы (breakup unconformity) и последующего образования бассейна с океанической корой. Но для Канадского бассейна этот вопрос дискуссионный. Во многих работах считается, что в эпоху континентального рифтинга в юре-валанжине (готериве) формировалась гипер-растянутая (переходная) кора Канадского бассейна (фаза 1 раскрытия бассейна по [Grantz et al., 2011]), а граница breakup — это граница начала спрединга типичной океанической коры (фаза 2 раскрытия бассейна по [Grantz et al., 2011]) [Grantz et al., 2011; Dietrich et al., 2018].

По своим геофизическим характеристикам гипер-растянутая (или переходная) континентальная кора Канадского бассейна мало отличается от нормальной океанической коры. Типичная толщина

этих типов коры составляет 10–5 км [Chain et al., 2016]. Нет однозначного понимания, что такое переходная кора. Обсуждаются варианты от эксгумации мантии с корой серпентинитового состава до сильно растянутой континентальной коры со значительным магматическим дополнением [Grantz et al., 2011; Chain et al., 2016]. Мы допускаем, что граница «breakup unconformity» (граница раскола литосферы) является временем начала формирования переходной коры Канадского бассейна. Поэтому, предполагается, что время формирования коры Канадского бассейна около 133–125 Ma [Nikishin et al., 2021c]. Эта модель согласуется с моделями других авторов, например, [Helwig et al., 2011; Døssing et al., 2020].

Обоснование времени формирования Канадского бассейна. Модель 2. Когда появляются новые данные, то часто возникают и принципиально новые концепции. Как мы отмечали выше, у подножья Чукотского Бордерленда в пределах бассейна Наутилус были драгированы базальты с возрастaми 105–100 и 90–70 Ma [Mukasa et al., 2020]. На основе этих данных была предложена «плюмовая» модель формирования бассейнов Наутилус, Стефанссона и Канадского. Сначала был подъем плюма



Рис. 6. Тектоническая реконструкция для неокма (берриаса-баррема) (145–125 Ма). Кинематическая реконструкция для 150 Ма. Условные обозначения см. рис. 5. Цифры в кружках: 1 — суша кратонов, 2 — шельфовые бассейны, 3 — приподнятая и тектонически активная суша, 4 — шельфовый бассейн с проградацией осадков (с клиноформами), 5 — аллювиальная равнина и мелководное море, 6 — флишевые и молассовые бассейны, 7 — континентальный склон, 8 — океанический бассейн, 9 — коллизионный ороген, 10 — аккреционно-коллизионный ороген, 11 — ороклины, 12 — ось спрединга. АТР — Амеразийский трансформный разлом. Фиолетовые линии показывают очертания некоторых террейнов, даны их названия. По [Nikishin et al., 2021c], с изменениями

с центром в точке пересечения осей современных бассейнов Наутилус, Стефанссона и Канадского (около 130–110 Ма) и формировались континентальные базальты (траппы) и дайки. Потом (около 110–100 Ма) активный рифтинг сосредоточился вдоль осей бассейнов Стефанссона и Канадского. Процессы завершились спредингом океанической коры в осевой зоне Канадского бассейна около 100–70 Ма [Mukasa et al., 2020]. Основная идея данной модели в том, что раскрытие Канадского бассейна явилось следствием подъема мантийного плюма и логичным завершением эпохи HALIP. Поздне-меловое раскрытие Канадского бассейна также предположено в работах [Dietrich et al., 2018; Miller et al., 2018; Akinin et al., 2020; Lundin et al., 2023]. Модель, предложенная в [Mukasa et al., 2020], хотя и противоречит многим ранее известным данным, но становится популярной среди геологов США и Канады (рис. 9).

Анализ сейсмических данных для обоснования соотношений структур Канадского бассейна и системы Альфа-Менделеева (Северо-Амеразийского домена). В Амеразийском бассейне для нас важнейшим сейсмостратиграфическим репером являются комплексы SDR в бассейнах, сопряженных с поднятием Альфа-Менделеева. Мы допускаем, что все эти сейсмокомплексы SDR имеют одинаковый или близкий возраст около 125–100 Ма [Nikishin et al., 2021b; 2023; 2024]. Достаточно неожиданным оказалось то, что комплексы типа SDR имеются и на северо-восточном склоне Чукотского Бордерленда (хребта Нортхвинд) [Chian et al., 2016; Nikishin et al., 2023; Lundin et al., 2023]. Мы пытаемся увязать сейсмостратиграфический уровень SDR комплексов бассейна Стефанссона и склона хребта Нортхвинд с сейсмокомплексами Канадского бассейна (рис. 10, 11). В бассейнах Стефанссона и Канадском в основании разреза на акустическом фундаменте и сразу на



Рис. 8. Тектоническая реконструкция для апта-альба (125–100 Ma). Кинематическая реконструкция для 115 Ma. По [Nikishin et al., 2021c], с изменениями. Представлена модель, согласно которой сначала сформировался Канадский бассейн, а затем область поднятия Альфа-Менделеева и сопряженные бассейны

Некоторые геофизические данные о строении Канадского бассейна. Для Канадского бассейна мало сейсмических профилей поперек осевого палео-спредингового хребта [Dietrich et al., 2018; Mosher et al., 2023; Hutchinson et al., 2024]. Сам палеохребет четко не выражен и его границы по сейсмическим данным однозначно провести нет возможности. Палеохребет выделяется по линейным магнитным аномалиям. Классическим примером отмершего срединно-океанического хребта является эоцен-раннеолигоценовый хребет Эгир (Aegir Ridge) в Северо-Атлантическом океане, для которого сейсмический профиль приведен в [Breivik et al., 2006]. Линейные магнитные аномалии отсутствуют в периферических частях Канадского бассейна. Отсутствие линейных аномалий обычно объясняется двумя возможными причинами: 1) эта кора формировалась в эпоху отсутствия инверсий магнитного поля (это интервал времени от середины баррема до кампана, что согласуется с моделью-2 для времени формирования Канадского бассейна); 2) механизм

формирования коры был таков, что линейные магнитные аномалии не формировались. Реально мы не знаем как формируется переходная или гиперрастянутая континентальная кора. Отметим, что для таких задуговых бассейнов, как Японское море, и других с условно океанической корой, линейные аномалии также не типичны [Artemieva, 2023].

Модели формирования Канадского бассейна. Мы допускаем, что и модель-1, и модель-2 относительно времени формирования Канадского бассейна могут быть реальностью (рис. 13). Реальностью могут быть и другие варианты. Здесь сначала мы обсудим историю и геодинамику формирования Канадского бассейна с вариантом-1 хронологии событий.

Основная проблема состоит в том, что по сейсмическим данным мы не видим границ между структурами собственно Канадского бассейна и структурами бассейнов Наутилус и Стефанссона и склона поднятия Альфа-Менделеева. Мы предполагаем, что сначала сформировался Канадский бассейн (примерно, до 125 Ма), а потом формировалась

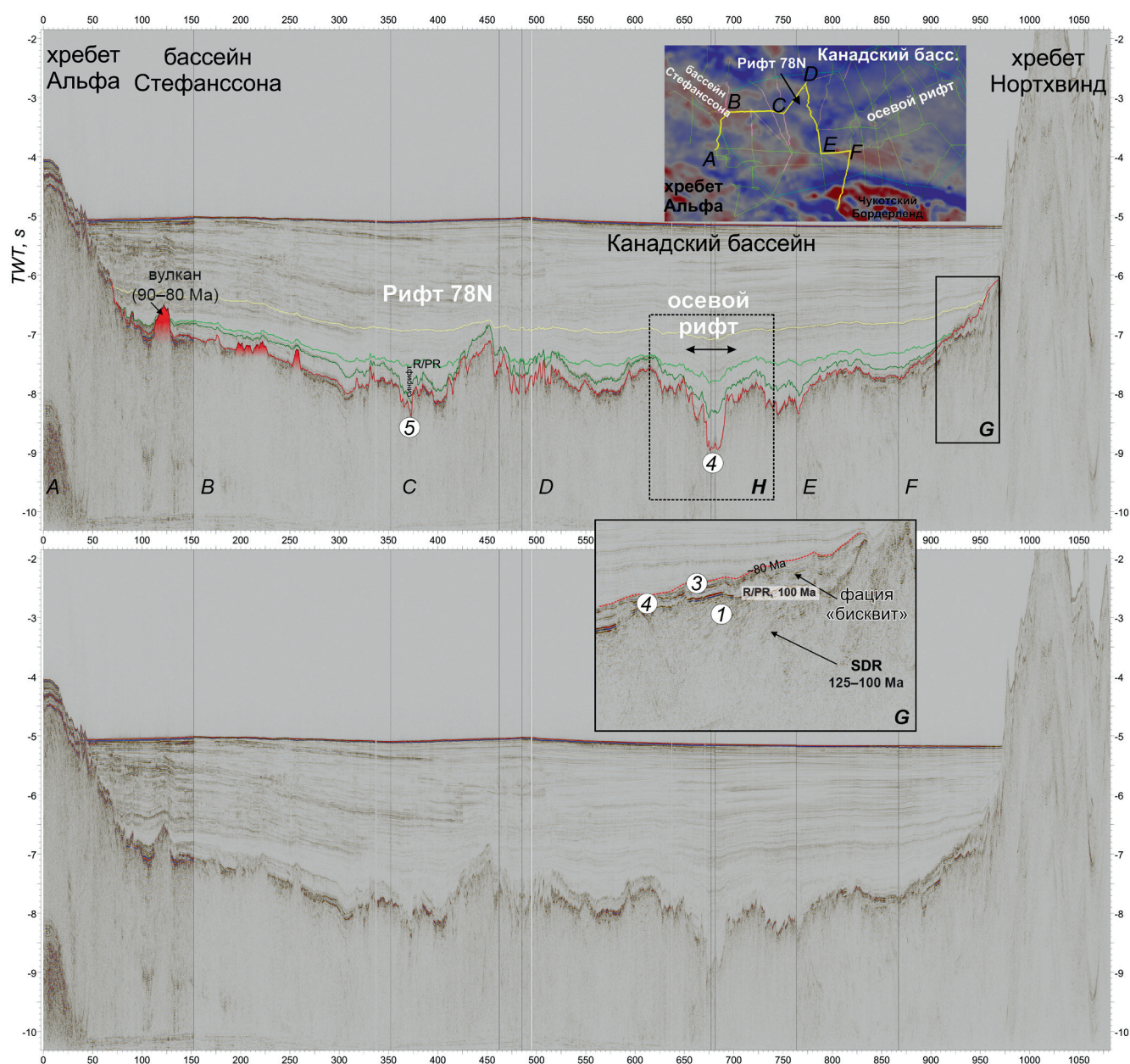


Рис. 10. Интерпретация композитного сейсмического профиля для района Канадского бассейна. Сейсмические профили по базе данных из [Shimeld et al., 2021]. Положение профиля показано на карте гравитационных аномалий, на которой хорошо видно положение осевого рифта; гравитационные аномалии по [Gaina et al., 2011]. На врезке показан фрагмент сейсмического профиля. Цифры в кружках — вероятная последовательность событий: 1 — формирование SDR комплекса (базальтовых покровов и осадков, около 125–100 Ma) в субаэральных и мелководных условиях; 2 — формирование мелководных морских осадков с возможными карбонатами; 3 — начало быстрого погружения континентального склона; 4 — формирование срединно-океанического хребта и его осевого рифта; 5 — формирование рифта 78 N. R/PR — граница рифт-пострифт. Вероятные вулканы в районе бассейна Стефанссона были отмечены в [Nikishin et al., 2023; Mosher et al., 2023; Hutchinson et al., 2024]. A, B, C, D, E, F — фрагменты композитного сейсмического профиля (их положение показано на карте). G — детальная часть сейсмического профиля и его позиция. H — положение фрагмента профиля показанного на рис. 11. Вертикальный масштаб в секундах (двойное время). Интерпретация сейсмических данных указывает скорее на быстрое формирование Канадского бассейна без фаз значительных перестроек

ся окраинно-континентальный вулканический пояс [Соколов и др., 2021; Akinin et al., 2020; Tikhomirov et al., 2023; Старикова и др., 2023].

Для Чукотки это вопрос более дискуссионный. Надсубдукционный окраинно-континентальный пояс начал формироваться с титона (в конце поздней юры) (Соколов и др., 2021) или с начала поздней юры и даже раньше [Tikhomirov et al., 2023]. На Чукотке

имеется система позднеюрско-валанжинских бассейнов, расположенных севернее окраинно-континентального вулканического пояса. Эти бассейны детально описаны в [Ватрушкина, 2021]. На основе данных, представленных в [Соколов и др., 2021; Ватрушкина, 2021; Nikishin et al., 2021c], мы эти бассейны объединяем в единый Раучуанский бассейн. Этот бассейн расположен севернее Южно-Чукотского

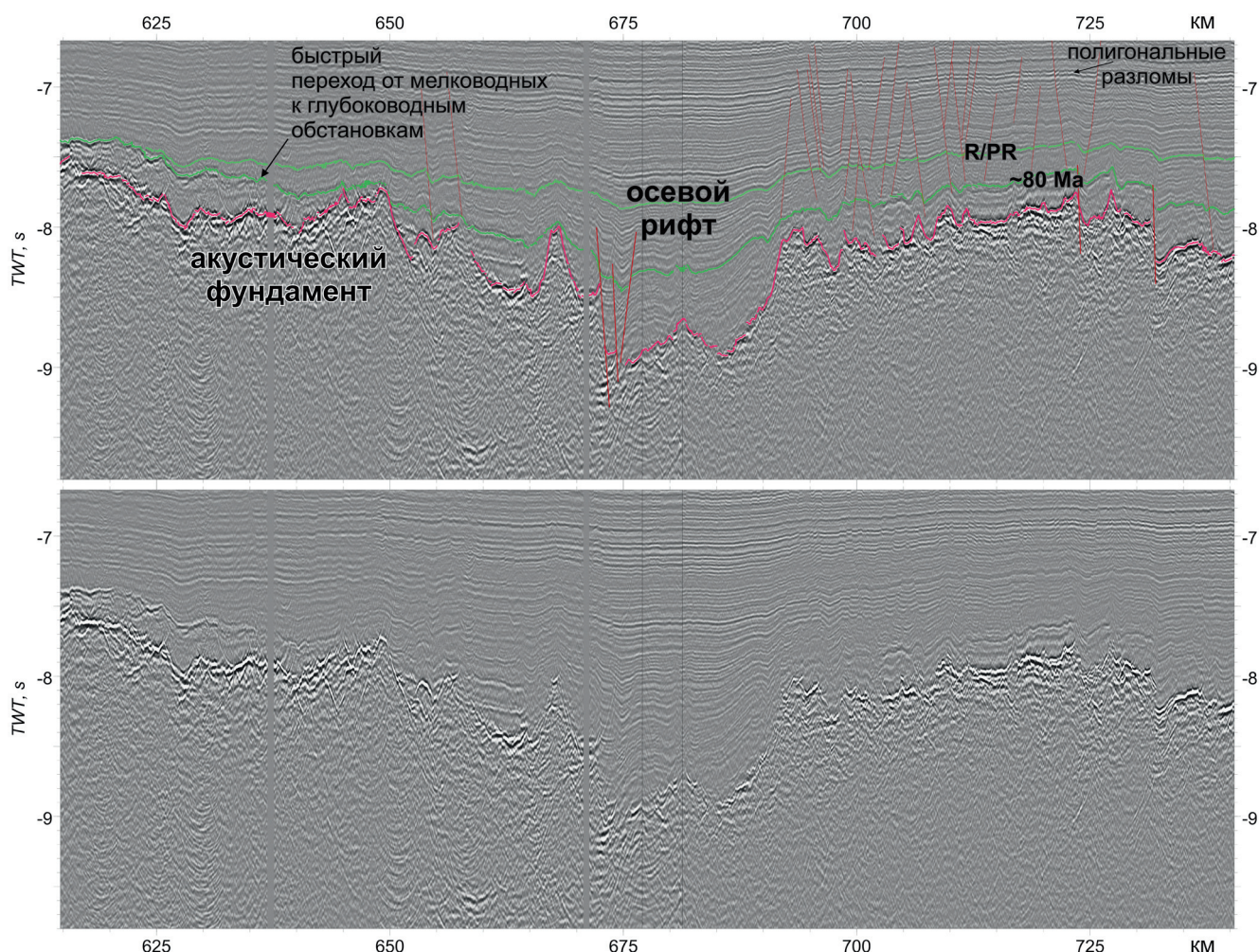


Рис. 11. Интерпретация фрагмента сейсмического профиля, показанного на рис. 10 (прямоугольник *H* на профиле). Граница ~80 Ма на склонах Канадского бассейна соответствует началу быстрого погружения всего бассейна с глубоководной седиментацией. Граница R/PR — это граница рифт-пострифт для бассейна Рифт 78 N. Уровни с полигональными разломами интерпретируются как толщи с глубоководными глинистыми осадками. Осевой рифт перекрывается осадками с вероятным возрастом около 80 Ма и моложе 100 Ма. Вертикальный масштаб в секундах (двойное время)

окраинно-континентального вулканического пояса [Nikishin et al., 2021c] и формировался примерно синхронно с ним. Поэтому его происхождение было, вероятно, обусловлено задуговыми надсубдукционными процессами. По данным [Ватрушкина, 2021] в нашей интерпретации сначала бассейн в оксфорд-кimmerидже формировался в обстановке растяжения (задугового растяжения), а потом в титоне-валанжине — в обстановке сжатия (задугового сжатия с переходом в коллизию). Максимальная коллизия в пределах Южно-Анжуйской коллизионной сутуры была в готериве-барреме [Соколов и др., 2021]. В апте-альбе была обстановка коллапса Верхояно-Чукотского орогена с его растяжением, внедрением гранитоидов и разнообразным вулканизмом [Miller et al., 2002; Nikishin et al., 2021c; Соколов и др., 2021; Akinin et al., 2020; Лучицкая и др., 2023; Tikhomirov et al., 2023]. Региональная тектоническая перестройка произошла около 106–100 Ма в связи с началом формирования Охотско-Чукотского вулканического пояса, который продолжал активность примерно до 77 Ма [Akinin et al., 2020; Tikhomirov et al., 2023].

Корреляция данных по Арктике показывает, что вероятное время формирования Канадского бассейна в интервале готерива-баррема совпадает с эпохой максимальной коллизии в Южно-Анжуйской сутуре. Здесь есть техническая проблема. Возраста границ баррема и апта постоянно уточнялись в геохронологической шкале. Многие магматические тела, датированные изотопными методами, раньше описывались как апт, а теперь стали барремом. Мы здесь используем шкалу 2023 г. (<https://stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2023-04.pdf>). В классической тектонике плит есть известная гипотеза, что при максимальной коллизии обычно происходит перестройка кинематики литосферных плит с одновременным формированием коллизионного орогена и расположенным на его продолжении задугового бассейна [Otsuki, 1989]. Мы предполагаем, что при коллизии в зоне Южно-Анжуйской сутуры скорость движения Тихоокеанской плиты под Аляску (на север) резко уменьшилось. Эта перестройка субдукционной системы могла привести к вращению и откату назад субдуцированного слэба и задуговому

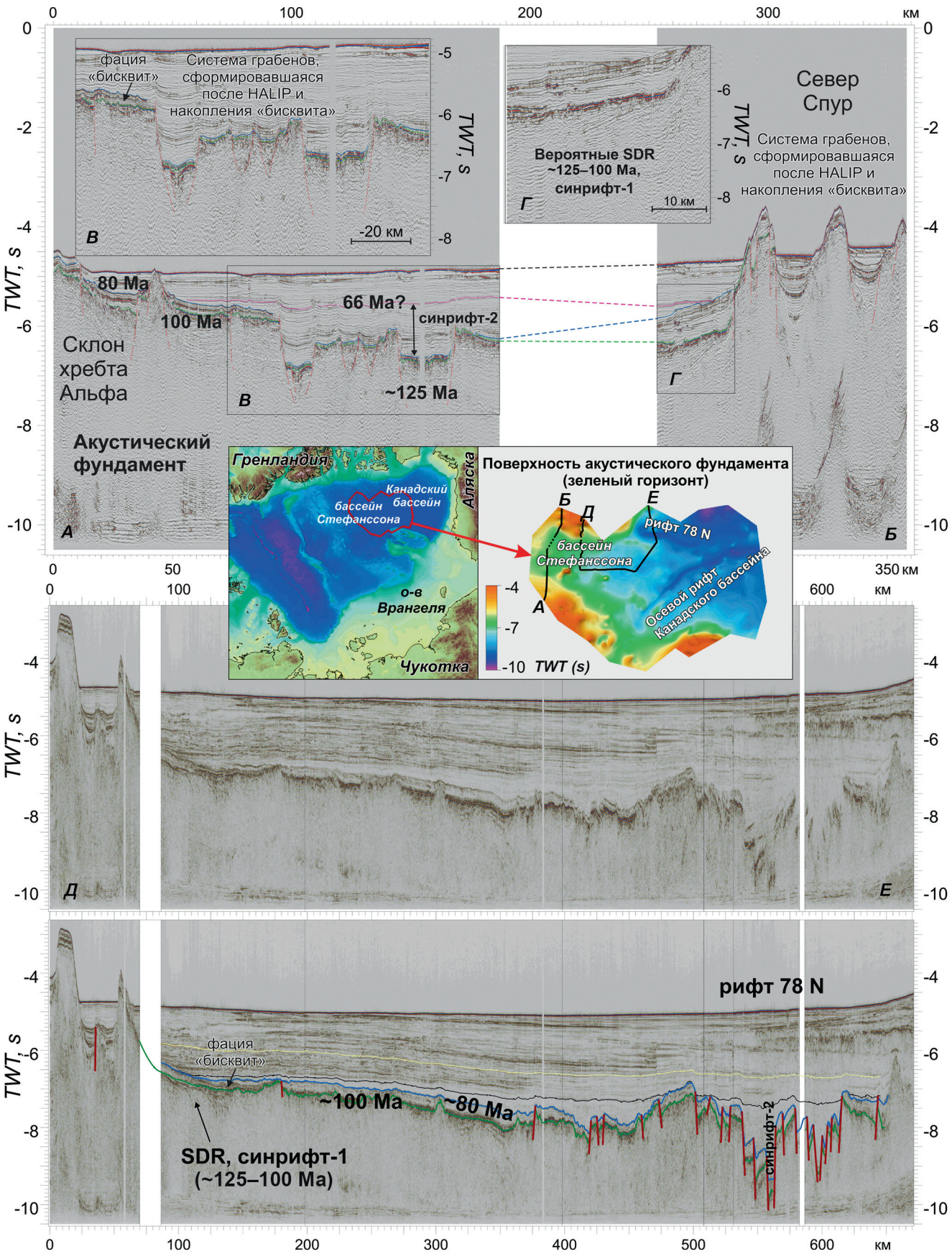


Рис. 12. Вверху — рифтовая система Север Спур. Сбросы моложе комплексов SDR. Вероятно, они формируют внутриплитный пояс рифтов с возрастом около 80–66 Ма. Внизу — на продолжении пояса грабен Север Спур выделяется Рифт 78 N. Вероятно, время рифтинга также около 80–66 Ма. Вертикальный масштаб в секундах (двойное время). По [Nikishin et al., 2023], с изменениями

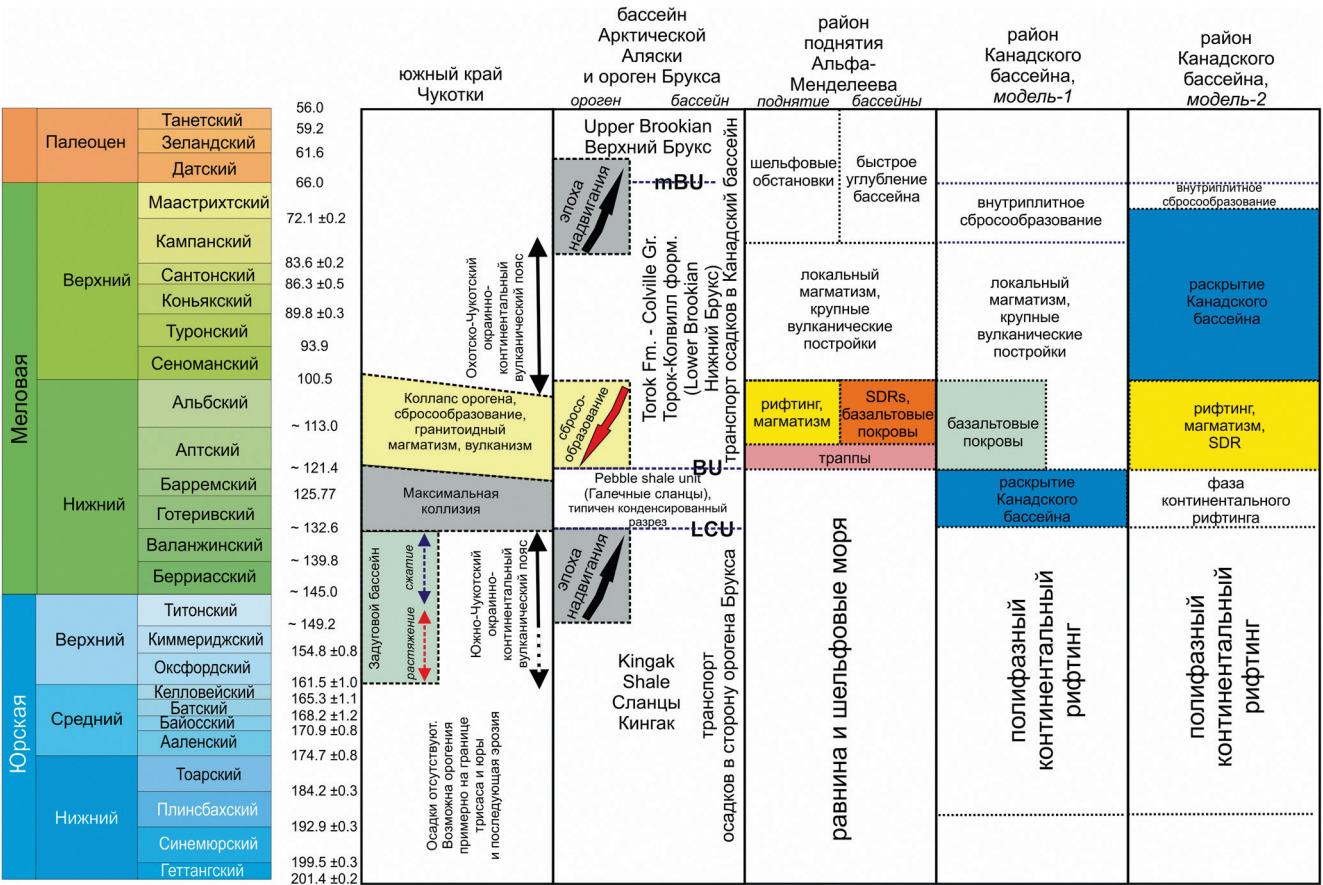


Рис. 13. Корреляция событий в районе Амеразийского бассейна и районов Чукотки и Аляски

растяжению (рис. 14). На современной Земле можно увидеть примерно сходные обстановки. Например, при коллизии Африкано-Аравийской и Евразийской литосферных плит идет современное формирование задуговых бассейнов Тирренского и Эгейского морей [Artemieva, 2023]. При гималайской коллизии Индии и Азии на продолжении зоны коллизии формируется задуговой бассейн Андаманского моря [Artemieva, 2023]. Модель задугового происхождения Канадского бассейна имеет ряд проблем. Современные обзоры для происхождения задуговых бассейнов приведены в [Gianni, Luján, 2021; Artemieva, 2023]. Очевидная проблема состоит в том, что во время его предполагаемого формирования расстояние от зоны субдукции (от желоба) до оси будущего раскрытия бассейна составляла порядка 600–700 км. В современных бассейнах это расстояние составляет обычно около 200–400 км [Artemieva, 2023]. Для некоторых меловых вероятных задуговых бассейнов Китая расстояние от желоба до бассейна составляло порядка 600–800 км [Liu et al., 2024]. Возможная геодинамика раскрытия Канадского бассейна как задугового элемента должна быть предметом отдельной публикации.

Модель «плюмового» происхождения Канадского бассейна как одной из трех рифтовых зон тройного сочленения, которая формировалась над

плюмом HALIP, была предложена, как отмечалось выше, в [Mukasa et al., 2020]. По этой модели примерно после 100 Ма рифтинг и спрединг океанической коры сфокусировались в Канадском бассейне и продолжались примерно до 70 Ма. В пользу данной модели свидетельствуют следующие данные. 1) Для бассейна Наутилус установлены базальты с возрастaми порядка 105–70 Ма [Mukasa et al., 2020]. По корреляциям сейсмических профилей эти базальты могут быть и в области Канадского бассейна; у нас пока нет однозначных данных. 2) На северо-восточном склоне хребта Нортхвинд установлены сейсмические комплексы SDR [Chian et al., 2016; Nikishin et al., 2023; Lundin et al., 2023] (см. рис. 10). Эти SDR комплексы могут иметь примерно одинаковый возраст с SDR комплексами бассейнов Толля, Стефанссона и поднятия Альфа-Менделеев, то есть возраст их базальтов около 125–100 Ма. Из этого следует, что кора Канадского бассейна может быть моложе 100 Ма. 3) Для континентальных окраин Канадского бассейна для низов коры характерны высокие сейсмические скорости, что типично для вулканических континентальных окраин [Chian et al., 2016]. 4) Отсутствие линейных магнитных аномалий для большей территории Канадского бассейна может указывать на то, что эта территория формировалась в эпоху без инверсий магнитного поля, то

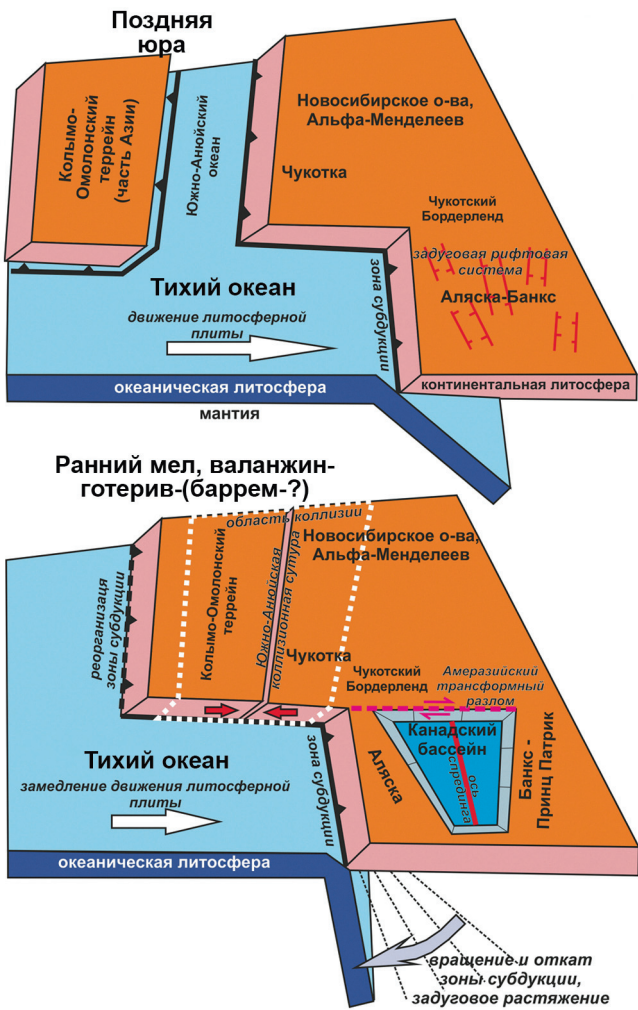


Рис. 14. Первый вариант модели задугового происхождения Канадского бассейна. Коллизия в полосе Южно-Аннуйской сутуры привела к замедлению движения Тихоокеанской плиты, откату зоны субдукции в сторону Тихого океана и формированию Канадского бассейна

есть 120–84 Ма (более вероятно, 100–84 Ма). Область с линейными магнитными аномалиями формировалась в эпоху инверсий около 84–70 Ма.

Дискуссия. Пока нет однозначной модели формирования Канадского бассейна. На современной Земле есть два основных типа бассейнов с океанической корой: океаны со срединно-океаническими хребтами и задуговые бассейны. Океаны образуют единую мировую систему. Задуговые бассейны не имеют связи с мировой системой срединно-океанических хребтов. Исходя из этого, можно с большей вероятностью допускать, что Канадский бассейн является задуговым по геодинамике формирования, при этом он формировался около 133–125 Ма (см. рис. 14).

Мы также можем отметить, что нет в мире примера океанического бассейна, сформированного над гипотетическим плюмом и не связанным с мировой системой срединно-океанических хребтов. «Плюмовую» модель формирования Канадского бассейна мы можем усложнить. Гипотетический плюм HALIP, например, прогрел и сделал более пластичной ли-

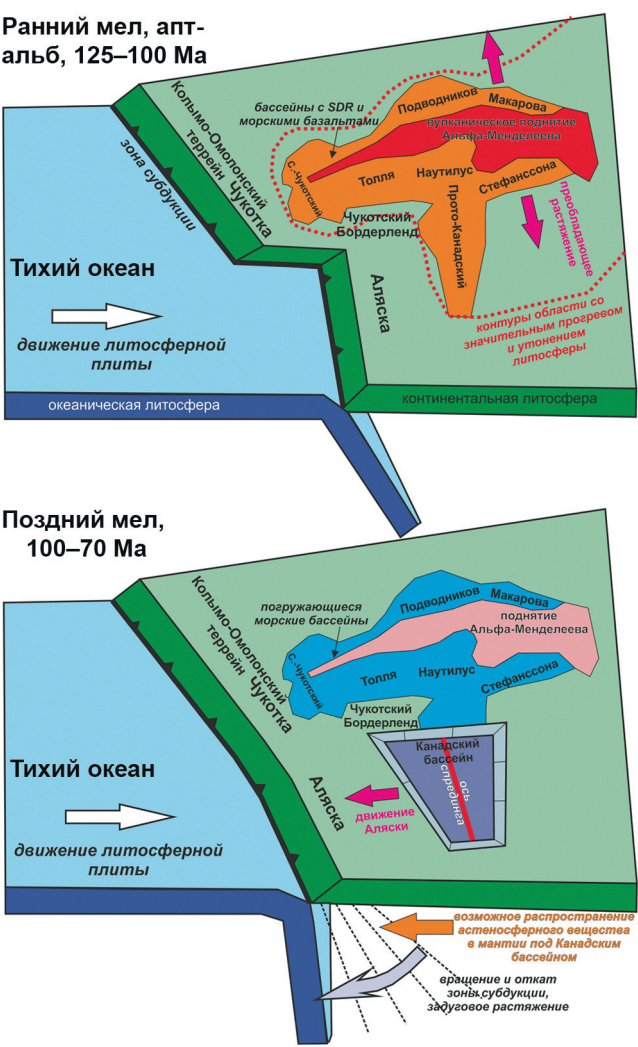


Рис. 15. Второй вариант модели задугового происхождения Канадского бассейна. В апте-альбе сформировались поднятие Альфа-Менделеева и сопряженные бассейны. Процессы сопровождались сильным растяжением и магматизмом. Раздвижение литосферных плит не происходило, процессы носили внутриплитный характер. При этом, возможно, была прогрета и ослаблена литосфера под будущим Канадским бассейном. В позднем мелу эта ослабленная зона литосферы была использована при задуговом растяжении при субдукции под Аляску. Позднемеловой откат Аляски в сторону зоны субдукции привел к формированию Канадского бассейна

тосферу будущего Канадского бассейна. Задуговое надсубдукционное растяжение в апте-позднем мелу привело к раскрытию Канадского бассейна по геодинамике формирования задугового бассейна с откатом зоны субдукции Тихого океана (см. рис. 9). В этом случае надо допускать отодвигание Аляски на юг на сотни километров в позднем мелу, как это допускается в [Miller et al., 2018; Akinin et al., 2020]. При этом, примерно 125–100 Ма формировались пассивные вулканические континентальные окраины, а около 100–70 Ма происходили сначала формирование переходной коры, а потом спрединг нормальной океанической коры (рис. 15).

Выводы. Мы допускаем минимум два варианта хронологии событий при формировании

Канадского бассейна. Первый вариант более традиционный. Сначала около 190–133 Ма был континентальный рифтинг в задуговой тектонической обстановке. Затем, около 133–125 Ма произошло задуговое (надсубдукционное) раскрытие Канадского бассейна сначала с переходной, а потом с нормальной океанической корой. После этого как минимум часть бассейна была перекрыта базальтами с возрастами около 125–100 Ма с последующим формированием крупных вулканических построек около 100–80 Ма.

Второй вариант пока менее традиционный. Сначала около 190–125 Ма был континентальный рифтинг в задуговой тектонической обстановке. Около 125–100 Ма была эпоха формирования поднятия Альфа-Менделеева и сопряженных бассейнов. На месте Канадского бассейна возник осевой континентальный рифт и в отдельных зонах в полосе этого рифта начали формироваться вулканические континентальные окраины с SDR комплексами. Затем, около 100–70 Ма было раскрытие Канадского бассейна. Сначала, около 100–84 Ма формировалась переходная кора, а затем, около 84–70 Ма формировалась нормальная океаническая кора.

Первый вариант формирования Канадского бассейна больше согласуется с данными континентальной геологии. Второй вариант предпочтительнее с позиций интерпретации сейсмических профилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ватрушкина Е.В. Верхнеюрско-нижнемеловые осадочные отложения Западной Чукотки // Труды Геологического института РАН. Вып. 625. М.: ГЕОС, 2021. 170 с.

Лобковский Л.И., Соколов С.Д., Сорохтин Н.О. и др. Двухъярусная субдукция в верхней мантии как механизм эволюции литосферы Восточной Арктики в поздней юре-раннем мелу // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500, № 2. С. 123–130.

Луцицкая М.В., Герцева М.В., Сысоев И.В. Геодинамика и раннемеловой магматизм Северного вулcano-плутонического пояса Верхояно-Колымской складчатой области (северо-восток России) // Геотектоника. 2023. № 5. С. 96–120.

Морозов А.Ф., Петров О.В., Шокальский С.П. и др. Новые геологические данные, обосновывающие континентальную природу области Центрально-Арктических поднятий // Региональная геология и металлогения. 2013. № 53. С. 34–55.

Никишин А.М., Сколотнев С.Г., Фулджер Дж.Р. и др. Строение коры поднятия Менделеева в Арктическом океане: синтез данных сейсморазведки и опробования горных пород // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 6. С. 3–15.

Соколов С.Д., Тучкова М.И., Леднева Г.В. и др. Тектоническая позиция Южно-Анжуйской сутуры // Геотектоника. 2021. № 5. С. 51–72.

Старикова Е.В., Галиева А.М., Коновалов А.Л. и др. Верхнеюрско-нижнемеловые отложения восточной части Олойской зоны: стратиграфия, геохимия, возраст и геодинамические обстановки формирования // Тихоокеанская геология. 2023. Т. 42, № 4. С. 3–29.

Вполне вероятны и другие интерпретации истории формирования Канадского бассейна.

Оба варианта предполагают, что главный механизм формирования Канадского бассейна — это задуговое (надсубдукционное) растяжение. В первом варианте причиной начала раскрытия Канадского бассейна была резкая перестройка кинематики плит Тихого океана во время максимальной коллизии в полосе Южно-Анжуйской сутуры. Во втором варианте прогрев литосферы в эпоху HALIP способствовал ее утонению. Вероятно, именно в зоне этой утоненной и ослабленной литосферы сфокусировалось задуговое растяжение в позднем мелу.

Первый вариант хронологии событий частично следует известной модели А. Гранца [Grantz et al., 2011]. Второй вариант — совсем другой взгляд на историю Канадского бассейна.

Благодарности. Авторы благодарны многим коллегам из ВНИИОкеангеология, ГИН РАН, ИО РАН, ИФЗ РАН, ВСЕГЕИ, ПАО «НК Роснефть», ИМГРЭ, МГУ, СПбГУ, НГУ за дискуссии по геологии Арктики. Мы благодарны В.В. Акинину и М.В. Луцицкой за конструктивные замечания для первой версии статьи. Работа была улучшена после критических замечаний рецензентов С.Ю. Соколова и Р.В. Веселовского.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект 24-17-00020).

Черных А.А., Яковенко И.В., Каминский В.Д. и др. Тектоническая схема Американо-Северного Ледовитого океана // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 510, № 2. С. 134–141.

Akinin V.V., Miller E.L., Toro J., et al. Episodicity and the dance of Late Mesozoic magmatism and deformation along the Northern Circum-Pacific margin: NE Russia to the Cordillera // Earth-Science Reviews. 2020. Vol. 208. 103272.

Artemieva I.M., Back-arc basins: A global view from geophysical synthesis and analysis // Earth-Science Reviews. 2023. Vol. 236. 104242.

Blakey R. Paleotectonic and paleogeographic history of the Arctic region // Atlantic Geology. 2021. Vol. 57. P. 7–39.

Breivik A.J., Mjelde R., Faleide J.I., et al. Rates of continental breakup magmatism and seafloor spreading in the Norway Basin–Iceland plume interaction // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111. B07102.

Brumley K., Miller E.L., Konstantinou A., et al. First bedrock samples dredged from submarine outcrops in the Chukchi Borderland, Arctic Ocean // Geosphere. 2015. Vol. 11. P. 76–92.

Chen Z., Dietrich J., Lane L.S., et al. Beaufort–Mackenzie Tectono-Sedimentary Element // Sedimentary Successions of the Arctic Region and their Hydrocarbon Prospectivity / Eds. S.S. Drachev, H. Brekke, E. Henriksen, T. Moore. Geological Society. London: Memoirs, 2024. Vol. 57.

Chernykh A., Glebovsky V., Zykov M., et al. New insights into tectonics and evolution of the Amerasia Basin // J. Geodyn. 2018. Vol. 119. P. 167–182.

Chian D., Jackson H.R., Hutchinson D.R., et al. Distribution of crustal types in Canada Basin, Arctic Ocean // Tectonophysics. 2016. Vol. 691. P. 8–30.

- Dietrich J.R., Chen Z., Hannigan P.K., et al. Oil and gas resource potential in the deep-water Canada Basin, Arctic Ocean // Geological Survey of Canada, Open File 8355 (revised). 2018. 31 p.
- Dixon J., Lane L.S., Dietrich J.R., et al. Geological History of the Late Cretaceous to Cenozoic Beaufort-Mackenzie Basin, Arctic Canada. The Sedimentary Basins of the United States and Canada // Elsevier B.V. 2019.
- Dobretsov N.L., Vernikovskiy V.A., Karyakin Y.V., et al. Mesozoic–Cenozoic volcanism and geodynamic events in the Central and Eastern Arctic // Russ. Geol. Geophys. 2013. Vol. 54. P. 874–887.
- Døssing A., Gaina C., Jackson H.R., et al. Cretaceous ocean formation in the High Arctic // Earth Planet. Sci. Lett. 2020. Vol. 551. P. 116552.
- Embry A. Petroleum prospectivity of the Triassic–Jurassic succession of Sverdrup Basin, Canadian Arctic Archipelago // Arctic Petroleum Geology. Geological Society / Eds. A.M. Spencer, A.F. Embry, D.L. Gautier, A.V. Stoupakova, K. Sørensen. London: Memoirs. 2011. Vol. 35. P. 545–558.
- Funck T., Shimeld J. Crustal structure and magmatism of the Marvin Spur and northern Alpha Ridge, Arctic Ocean // Geophysical Journal International. 2023. Vol. 233. Issue 1. P. 740–768.
- Gaina C., Werner S.C., Saltus R., et al. Chapter 3. Circum-Arctic mapping project: new magnetic and gravity anomaly maps of the Arctic // Geol. Soc. London, Mem. Vol. 35. 2011. P. 39–48.
- Geoffroy L., Chauvet F., Ringenbach J.-C. Middle-lower continental crust exhumed at the distal edges of volcanic passive margins // Communications Earth & Environment. 2022. Vol. 3. 95.
- Gianni G.M., Luján S.P. Geodynamic controls on magmatic arc migration and quiescence // Earth-Science Reviews. 2021. Vol. 218. P. 103676.
- Grantz A., Hart P., Childers V. Geology and tectonic development of the Amerasia and Canada Basins, Arctic Ocean // Spencer A.M., Embry A.F., Gautier D.L., Stoupakova A.V., Sørensen, K. (eds.) Arctic Petroleum Geology. Geol. Soc. London, Mem. 35. 2011. P. 771–799.
- Hadlari T., Midwinter D., Galloway J.M., et al. Mesozoic rift to post-rift tectonostratigraphy of the Sverdrup Basin, Canadian Arctic // Mar. Pet. Geol. 2016. Vol. 76. P. 148–158.
- Harrison J.C., St-Onge M.R., Petrov O.V., et al. Geological map of the Arctic; Geological Survey of Canada, Map 2159A, scale 1:5 000 000 // Geological Survey of Canada. 2011.
- Helwig J., Kumar N., Emmet P., et al. Chapter 35 Regional seismic interpretation of crustal framework, Canadian Arctic passive margin, Beaufort Sea, with comments on petroleum potential // Geol. Soc. London, 2011. Mem. 35. P. 527–543.
- Hoiland C.W., Mille E.L., Pease V. Greenschist facies metamorphic zircon overgrowths as a constraint on exhumation of the Brooks Range metamorphic core, Alaska // Tectonics. 2018. Vol. 37. P. 3429–3455.
- Houseknecht D.W. Evolution of the Arctic Alaska Sedimentary Basin. The Sedimentary Basins of the United States and Canada, 2019.
- Hutchinson D.R., Houseknecht D.W., Mosher D.C. Canada Basin Tectono-Sedimentary Element, Arctic Ocean // Sedimentary Successions of the Arctic Region and their Hydrocarbon Prospectivity / Eds. S.S. Drachev, H. Brekke, E. Henriksen, T. Moore // Geological Society. London, 2024. Memoirs, 57.
- Hutchinson D.R., Jackson H.R., Houseknecht D.W., et al. Significance of Northeast-Trending Features in Canada Basin, Arctic Ocean // Geochemistry. Geophys. Geosystems. 2017. Vol. 18. P. 4156–4178.
- Jakobsson M., Mayer L.A., Bringensparr C., et al. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0 // Sci Data. 2020. Vol. 7. P. 176.
- Kashubin S.N., Petrov O.V., Artemieva I.M., et al. Crustal structure of the Mendeleev Rise and the Chukchi Plateau (Arctic Ocean) along the Russian wide-angle and multichannel seismic reflection experiment “Arctic-2012” // J. Geodyn. 2018. Vol. 119. P. 107–122.
- Lebedeva-Ivanova N., Gaina C., Minakov A., et al. ArcCRUST: Arctic Crustal Thickness From 3-D Gravity Inversion // Geochemistry, Geophys. Geosystems. 2019. 2018GC008098.
- Liu K., Xiao W., Wilde S. A., et al. Arc magmatism controlled by switches in tectonic style: Insights from the NE Asian margin in the Cretaceous // Geophysical Research Letters. 2024. Vol. 51. e2023GL105111.
- Lundin E.R., Doré A.G., Naliboff J., et al. Utilization of continental transforms in break-up: observations, models, and a potential link to magmatism // Nemčok M., Doran H., Doré A.G., Ledvényiová L., Rybár S. (eds.), 2023. Tectonic Development, Thermal History and Hydrocarbon Habitat Models of Transform Margins: their Differences from Rifted Margins // Geological Society, London, Special Publications. 2023. Vol. 524. P. 121–145.
- Miller E.L., Akinin V.V., Dumitru T.A., et al. Deformational history and thermochronology of Wrangel Island, East Siberian Shelf and coastal Chukotka, Arctic Russia // Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 2018. Vol. 460. P. 207–238.
- Miller E.L., Gelman M., Parfenov L., et al. Tectonic setting of Mesozoic magmatism: A comparison between northeastern Russia and the North American Cordillera // Tectonic Evolution of the Bering Shelf-Chukchi Sea-Arctic Margin and Adjacent Landmasses. Geol. Soc. Am. 2002.
- Miller E.L., Hudson T.L., Mid-Cretaceous extensional fragmentation of a Jurassic-Early Cretaceous Compressional Orogen, Alaska // Tectonics. 1991. Vol. 10. P. 781–796.
- Moore T.E., O’Sullivan P.B., Potter C.J., et al. Provenance and detrital zircon geochronologic evolution of lower Brookian foreland basin deposits of the western Brooks Range, Alaska, and implications for early Brookian tectonism // Geosphere. 2015. Vol. 11. P. 93–122.
- Mosher D., Dickson M.-L., Shimeld J., et al. Canada’s maritime frontier: the science legacy of Canada’s extended continental shelf mapping for UNCLOS // Can. J. Earth Sci. 2023, 00: 1–51.
- Mukasa S.B., Andronikov A., Brumley K., et al. Basalts from the Chukchi Borderland: 40Ar/39Ar Ages and Geochemistry of submarine intraplate lavas dredged from the western Arctic Ocean // American Geophysical Union. 2020.
- Nikishin A.M., Foulger G.R., Akinin V.V., et al. Arctic Cretaceous tectonic and igneous mega-province (TIMP): regional domains and geodynamics // Journal of Geodynamics. 2024.
- Nikishin A.M., Malyshev N.A., Petrov E.I., Geological Structure and History of the Arctic Ocean // EAGE Publications bv. 2014.
- Nikishin A.M., Petrov E.I., Startseva K.F., et al. Seismostratigraphy, paleogeography and paleotectonics of the Arctic deep-water basin and its Russian shelf // Transactions of the Geological Institute. Moscow: GIN RAS, 2022. 156 p.
- Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S., et al. Arctic Ocean Mega Project: Paper 1 — Data collection // Earth-Sci. Rev. 2021a. Vol. 217. 103559.

Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S., et al. Arctic Ocean Mega Project: Paper 2 — Arctic stratigraphy and regional tectonic structure // *Earth-Sci. Rev.* 2021b. Vol. 217. 103581.

Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S., et al. Arctic Ocean Mega Project: Paper 3 — Mesozoic to Cenozoic geological evolution // *Earth-Sci. Rev.* 2021c. Vol. 217. 103034.

Nikishin A.M., Rodina E.A., Startseva K.F., et al. Alpha-Mendelev Rise, Arctic Ocean: A double volcanic passive margin // *Gondwana Res.* 2023.

Oakey G.N., Saltus R.W. Geophysical analysis of the Alpha-Mendelev ridge complex: Characterization of the High Arctic Large Igneous Province // *Tectonophysics.* 2016. Vol. 691. P. 65–84.

Otsuki K. Empirical relationship among the convergence rate of plates, rollback rate of trench axis and island-arc tectonics: “laws of convergence rate of plates” // *Tectonophysics.* 1989. Vol. 159. P. 73–94.

Parfenov L.M., Natal'in B.A. Mesozoic tectonic evolution of Northeastern Asia // *Tectonophysics.* 1986. Vol. 127. P. 291–304.

Petrov O., Morozov A., Shokalsky S., et al. Crustal structure and tectonic model of the Arctic region // *Earth-Sci. Rev.* 2016. Vol. 154. P. 29–71.

Petrov O.V., Smelror M. (eds.). Tectonics of the Arctic // Springer Geology. 2021.

Piskarev A., Poselov V., Kaminsky V. (Eds.) Geologic Structures of the Arctic Basin. Springer International Publishing, Cham. 2019.

Rodina E.A., Nikishin A.M., Startseva K.F., et al. Cretaceous volcanism and intrusive magmatism features in the Mendelev Rise region (Arctic Ocean) according to seismic data // *Moscow University Geol. Bull.* 2022. Vol. 77, No. 5. P. 447–465.

Saltus R.W., Miller E.L., Gaina C., et al. Chapter 4. Regional magnetic domains of the Circum-Arctic: a framework for geodynamic interpretation // *Geol. Soc. London, Mem.* 2011. Vol. 35. P. 49–60.

Shephard G.E., Müller R.D., Seton M. The tectonic evolution of the Arctic since Pangea breakup: Integrating constraints from surface geology and geophysics with mantle structure // *Earth-Science Rev.* 2013. Vol. 124. P. 148–183.

Shimeld J.W., Chian D., Jackson H.R., et al. Evidence for an important tectonostratigraphic seismic marker across Canada

Basin and southern Alpha Ridge of the Arctic Ocean // *Geological Survey of Canada, Open File.* 2011. 6822.

Shimeld J.W., Boggild K., Mosher D.C., et al. Reprocessed multi-channel seismic-reflection data set from the Arctic Ocean, collected using icebreakers between 2007–2011 and 2014–2016 for the Canadian Extended Continental Shelf program // *Geological Survey of Canada, Open File* 8850, 1.

Skolotnev S., Aleksandrova G., Isakova T., et al. Fossils from seabed bedrocks: Implications for the nature of the acoustic basement of the Mendelev Rise (Arctic Ocean) // *Mar. Geol.* 2019. Vol. 407. P. 148–163.

Skolotnev S.G., Fedonkin M.A., Korniychuk A.V. New data on the age of magmatic rocks of the Alpha-Mendelev Rise (Arctic Ocean) based on the results of isotopic U/Pb dating of zircons // *Doklady Earth Sciences.* 2023. Vol. 513, Part 1. P. 1104–1109.

Skolotnev S.G., Freiman S.I., Khisamutdinova A.I., et al. Sedimentary Rocks in the Basement of the Alpha-Mendelev Rise, Arctic Ocean // *Lithology and Mineral Resources.* 2022. Vol. 57, No. 2. P. 121–142.

Sokolov S.D. Tectonics of Northeast Asia: an overview // *Geotectonics.* 2010. Vol. 44, No. 6. P. 493–509.

Sokolov S.D., Tuchkova M.I., Ganelin A.V., et al. Tectonics of the South Anyui Sutere, Northeastern Asia. 2015 // *Geotectonics.* 2015. Vol. 49, No. 1. P. 3–26.

Sømme T.O., Doré A.G., Lundin E.R., et al. Triassic–Paleogene paleogeography of the Arctic: Implications for sediment routing and basin fill // *AAPG Bulletin.* 2018. Vol. 102, No. 12. P. 2481–2517.

Tikhomirov P.L., Luchitskaya M.V., Prokofiev V.Y., et al. Evolution of Aptian and Albian magmatism of Western and Northern Chukotka (Northeast Russia) based on zircon U-Pb geochronology and rock geochemistry. Evolution of Aptian and Albian magmatism of Western and Northern Chukotka (Northeast Russia) based on zircon U-Pb geochronology and rock geochemistry // *International Geology Review.* 2023.

Zhang T., Dyment J., Gao J.Y. Age of the Canada Basin, Arctic Ocean: indications from high-resolution magnetic data // *Geophysical Research Letters.* 2019. Vol. 46. P. 13 712–13 721.

Статья поступила в редакцию 15.05.2024,
одобрена после рецензирования 03.06.2024,
принята к публикации 25.10.2024