ISSN 0002-3272



ТРУДЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Никишин А.М., Петров Е.И., Старцева К.Ф., Родина Е.А., Посаментиер Х., Фоулджер Дж., Глумов И.Ф., Морозов А.Ф., Вержбицкий В.Е., Малышев Н.А., Фрейман С. И., Афанасенков А.П., Безъязыков А.В., Доронина М.С., Никишин В.А., Сколотнев С.Г., Черных А.А.

# Сейсмостратиграфия, палеогеография и палеотектоника Арктического глубоководного бассейна и его российских шельфов



# Transactions of the Geological Institute

Founded in 1932 Vol. 632

A.M. Nikishin<sup>1</sup>, E. I. Petrov<sup>2</sup>, K. F. Startseva<sup>1</sup>, E. A. Rodina<sup>1</sup>, H. W. Posamentier<sup>3</sup>, G. R. Foulger<sup>4</sup>, I.F. Glumov<sup>2</sup>, A.F. Morozov<sup>2</sup>, V. E. Verzhbitsky<sup>5</sup>, N. A. Malyshev<sup>5</sup>, S.I. Freiman<sup>1</sup>, A. P. Afanasenkov<sup>6</sup>, A. V. Beziazykov<sup>2</sup>, M.S. Doronina<sup>5</sup>, V.A. Nikishin<sup>5</sup>, S.G. Skolotnev<sup>7</sup>, A. A. Chernykh<sup>8</sup>

- <sup>2</sup>The Federal Subsoil Resources Management Agency, Moscow
- <sup>3</sup>Consultant, 2134 Sea Way, Bodega Bay, CA, USA
- <sup>4</sup>Department of Earth Sciences, Durham University, UK
- <sup>5</sup>Rosneft Oil Company, Moscow
- <sup>6</sup>Rosgeo, Moscow
- <sup>7</sup>Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow
- <sup>8</sup>VNIIOkeangeologia, Saint Petersburg

# Seismostratigraphy, paleogeography and paleotectonics of the Arctic deep-water basin and its Russian shelf

Moscow GIN RAS 2022

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Moscow State University, Moscow

# Труды Геологического института

Основаны в 1932 году Вып. 632

А.М. Никишин<sup>1</sup>, Е.И. Петров<sup>2</sup>, К.Ф. Старцева<sup>1</sup>, Е.А. Родина<sup>1</sup>, Х. Посаментиер<sup>3</sup>, Дж. Фоулджер<sup>4</sup>, И.Ф. Глумов<sup>2</sup>, А.Ф. Морозов<sup>2</sup>, В.Е. Вержбицкий<sup>5</sup>, Н.А. Малышев<sup>5</sup>, С. И. Фрейман<sup>1</sup>, А.П. Афанасенков<sup>6</sup>, А.В. Безъязыков<sup>2</sup>, М.С. Доронина<sup>5</sup>, В.А. Никишин<sup>5</sup>, С.Г. Сколотнев<sup>7</sup>, А.А. Черных<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва

<sup>2</sup>Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра), Москва

<sup>3</sup>Консультант, Калифорния, США

<sup>4</sup>Департамент наук о Земле, университет Дарема, Великобритания

5ПАО НК "Роснефть"

<sup>6</sup>АО «Росгеология», Москва

<sup>7</sup>Геологический институт РАН, Москва

<sup>8</sup>ФГБУ «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга», Санкт-Петербург

Сейсмостратиграфия, палеогеография и палеотектоника Арктического глубоководного бассейна и его российских шельфов

Москва ГИН РАН 2022 УДК 55(1/9)(268) ББК 26.323 Т 78

### Ответственный редактор: Н.Б. Кузнецов

Редакционная коллегия:

К.Е. Дегтярев (главный редактор), Н.Б. Кузнецов (заместитель главного редактора), Г.Н. Александрова (ответственный секретарь), Ю.О. Гаврилов, А.Б. Герман, В.Ю. Лаврушин, Б.Г. Покровский, М.А. Рогов, С.Д. Соколов, С.Ю. Соколов, М.И. Тучкова, М.А. Федонкин, М.Д. Хуторской, Н.П. Чамов

Рецензенты: Г.Л. Лейченков, С.Ю. Соколов

Труды Геологического института / Геол. ин-т. — М.: Изд-во АН СССР, 1932–1964. — М.: Наука, 1964. –.– ISSN 0002-3272

Вып. № 632: Сейсмостратиграфия, палеогеография и палеотектоника Арктического глубоководного бассейна и его российских шельфов/ Никишин А.М. и др.; Отв. ред. Н.Б. Кузнецов. – Москва: ГИН РАН, 2022. – 156 с. DOI: 10.54896/00023272\_2022\_632\_1

Для Арктического океана и его Российских шельфов разработана схема сейсмостратиграфии. Основой схемы послужили результаты интерпретации сейсмических профилей с выделением ключевых границ, разделяющих основные сейсмические комплексы, геологические данные по прилегающей островной и материковой суше, сведения о возрасте линейных магнитных аномалий в Евразийском бассейне, а также данные бурения морских скважин. Выделены границы с прогнозными возрастами 125, 100, 66, 56, 45 и 20 млн. лет. Эти границы прослежены для большей части океана и его шельфов. В истории океана выделено три этапа развития: 133-125 Ма (главная фаза формирования Канадского бассейна), 125-56 Ма (формирование поднятия Альфа-Менделеева и сопряженных глубоководных бассейнов), 56-0 Ма (раскрытие Евразийского бассейна). Основные этапы континентального рифтинга приходятся на позднюю юру, апт-альб, палеоцен и средний-поздний эоцен. Для района поднятия Альфа-Менделеева предложена новая геодинамическая модель. Показано, что он формировался в апте-альбе как вулканическая пассивная окраина Евразии. Для Арктического региона представлена серия палеогеографических и палеотектонических карт. Работа, по существу, является атласом интерпретированных сейсмических профилей и палеогеографических/палеотектонических карт, сопровождаемых объяснительной запиской.

ББК 26.323

#### Responsible Editor: N.B. Kuznetsov

EditorialBoard:

K.E. Degtyarev (Editor-in-Chief), N.B. Kusnetsov (Deputy Editor-in-Chief), G.N. Aleksandrova (Executive Secretary), Yu.O. Gavrilov, A.B. Herman, V.Yu. Lavrushin, B.G. Pokrovskii, M.A. Rogov, S.D. Sokolov, S.Yu. Sokolov, M.I. Tuchkova, M.A. Fedonkin, M.D. Khutorskoy, N.P. Chamov

#### R e v i e w e r s: G.L. Leichenkov, S.D. Sokolov

Transactions of the Geological Institute / Geological Inst. — Moscow: Publishers of the USSR Academy of Sciences, 1932–1964. — Moscow: Nauka, 1964. –.– ISSN 0002-3272

Vol. № 632: Seismostratigraphy, paleogeography and paleotectonics of the Arctic deep-water basin and its Russian shelf / Nikishin A.M. et al.; Ed. by N.B. Kuznetsov. – Moscow: GIN RAS, 2022, 156 p. DOI: 10.54896/00023272\_2022\_632\_1

A seismostratigraphy scheme has been developed for the Arctic Ocean and its Russian shelves. Stratigraphy scheme is based on the results of interpretation of seismic profiles with the identification of key boundaries separating the main seismic complexes, geological data on the adjacent island and continental land, information on the age of linear magnetic anomalies in the Eurasian Basin, as well as drilling data from offshore wells. Boundaries with predicted ages of 125, 100, 66, 56, 45, and 20 Ma have been identified. These boundaries are traced for most of the ocean and its shelves. Three stages of development have been distinguished in the history of the ocean: 133-125 Ma (the main phase of the formation of the Canadian Basin), 125-56 Ma (formation of the Alpha-Mendeleev Rise and associated deep-water basins), 56-0 Ma (opening of the Eurasian Basin). The main stages of continental rifting were in the Late Jurassic, Aptian-Albian, Paleocene, Middle-Late Eocene. We have proposed a new geodynamic model for the Alpha-Mendeleev Rise region, showing that it was formed in the Aptian-Albian as a volcanic passive margin of Eurasia. A series of paleogeographic and paleotectonic maps is presented for the Arctic region. The work is essentially an atlas of interpreted seismic profiles and paleogeographic/paleotectonic maps, accompanied by an explanatory note.

© А.М. Никишин, Е.И. Петров, К.Ф. Старцева, Е.А. Родина, Х. Посаментиер, Дж. Фоулджер, И.Ф. Глумов, А.Ф. Морозов, В.Е. Вержбицкий, Н.А. Малышев, С. И. Фрейман, А.П. Афанасенков, А.В. Безъязыков, М.С. Доронина, В.А. Никишин, С.Г. Сколотнев, А.А. Черных, 2022 © ГИН РАН, 2022

# Оглавление

	Стр.
Введение	5
1. Краткий геологический обзор	7
2. Данные и методы работы	14
3. Краткий обзор существующих представлений о стратиграфии и тектонике	
Арктики	15
4. Основы сейсмостратиграфии Арктического океана	19
5. Сейсмостратиграфия Амеразийского бассейна	23
6. Сейсмостратиграфия и хроностратиграфия хребта Ломоносова	60
7. Сейсмостратиграфия и хроностратиграфия Евразийского бассейна	63
8. Сейсмостратиграфия и хроностратиграфия шельфовых бассейнов Восточной	
Арктики	67
9. Структуры сжатия в бассейнах Восточно-Сибирского и Чукотского морей	95
10. Климатостратиграфия Арктики по сейсмическим данным	97
11. Атлас палеогеографических и палеотектонических карт	100
12. Хроностратиграфия некоторых осадочных бассейнов Арктического региона	125
13. Геодинамическая история района поднятия Альфа-Менделеева	129
Заключение	136
Литература	137

Введение

# Введение

Район Арктического (Северного Ледовитого) океана изучается давно. Основные сведения об истории его изучения представлены, например, в (Пущаровский, 1960, 1976; Хаин, 1985, Богданов, 2004; Пискарев и др., 2016; Piskarev et al., 2019; Petrov, Smelror, 2021). Новый этап в изучении Арктики начался примерно в последние 20 лет (официально с 2005 года), когда правительством РФ было принято решение детально исследовать Арктику для научного обоснования Внешней Границы Континентального Шельфа (ВГКШ) России. В этом проекте участвовало много институтов МПР РФ, академических институтов и университетов. Научное руководство проектом осуществлялось Ю.Б. Казминым (МПР РФ). От МПР РФ и Роснедра основными ответственными институтами были ФГБУ «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга» и ФГБУ «ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского». От РАН РФ руководил проектом академик Н.П. Лаверов. Большой вклад в практическую реализацию проекта внесли многие сотрудники МПР РФ и Роснедра (И.Ф. Глумов, Е.А. Киселев, А.Ф. Морозов, Е.И. Петров и др.) под руководством Правительства РФ.

Данная работа является коллективным трудом специалистов из МГУ им. М.В. Ломоносова (А.М. Никишин, К.Ф. Старцева, Е.А. Родина, С.И. Фрейман), ПАО НК "Роснефть" (В.Е. Вержбицкий, Н.А. Малышев, М.С. Доронина, В.А. Никишин) и специалистов из Роснедра (Е.И. Петров, И.Ф. Глумов, А.Ф. Морозов, А.В. Безъязыков). Также в работе принимали участие сотрудники Росгеологии (А.П. Афанасенков), ВНИИОкеангеология (А.А. Черных) и ГИН РАН (С.Г. Сколотнев). Соавторами являются Henry Posamentier (США) и Gillian Foulger (Англия). Henry является одним из лучших специалистов в мире по интерпретации сейсмических данных; для многих бассейнов Арктики он разработал основы секвентной стратиграфии. Henry в основном работал в нефтяных компаниях. Gillian одна из наиболее известных в мире специалистов по геодинамике и магматическим провинциям.

В данной работе мы использовали максимально полную базу геофизических и геологических данных для обоснования сейсмостратиграфии и создания геологической модели района Арктического океана. В последние годы мы работали в составе рабочей группы по созданию «Геологической модели Северного Ледовитого океана» при МПР РФ и Роснедра. В состав рабочей группы входили специалисты из ВНИИОкеангеология, ВСЕГЕИ, МГУ им. М.В. Ломоносова, ГИН РАН, Санкт-Петербургского горного

### Введение

университета, а также ИФЗ РФН, ИО РАН, ИНГГ СО РАН и других организаций. Наши дискуссии привели к тому пониманию, что на сегодняшний день нет возможности создать такую модель геологического строения Арктического океана, которая бы была согласована со всеми участниками рабочей группы.

Основа нашей модели геологического строения Арктического океана была предложена А.М. Никишиным, Н.А. Малышевым и Е.И. Петровым (Nikishin et al., 2014). Здесь мы развиваем данную модель с учетом поступивших за последние несколько лет новых, принципиально важных данных по геологии Арктики.

При создании нашей модели геологического строения района Арктического океана мы общались почти со всеми специалистами по Арктике и Северной Атлантике. В России это В.А. Верниковский, Л.И. Лобковский, В.Д. Каминский, А.И. Ханчук, Е.В. Артюшков, М.А. Федонкин, С.Д. Соколов, О.В. Петров, В.В. Акинин, Д.В. Метелкин, Диденко, А.Б. Герман, А.К. Худолей, А.Б. Кузьмичев, А.В. Прокопьев, A.H. Э.В. Шипилов, А.В. Ступакова, Е.А. Гусев, П.В. Рекант, В.А. Посёлов, С.Н. Кашубин, А.С. Алексеев, Г.Н. Александрова, Б.Л. Никитенко, С.Ю. Соколов, В.А. Савин, Е.А. Кораго, Н.Н. Соболев, М.К. Косько, Д.А. Застрожнов, О.Е. Смирнов, Г.Л. Лейченков, В.Б. Ершова. Л.А. Дараган-Сущева, С.П. Шокальский, В.Ф. Проскурнин, Т.Ю. Толмачева, М.И. Тучкова, М.К. Данукалова, В.В. Костылева, Ю.В. Карякин, Н.Ю. Матушкин, А.В. Соловьёв, С.И. Шкарубо, А.В. Савицкий. Н.А. Петровская и др. Из зарубежных исследователей мы были в научных контактах и дискуссиях с С. Gaina, E. Miller, S. Cloetingh, V. Pease, W. Jokat, D. Hutchinson, J.I. Faleide, S. Drachev, R. Stephenson, D. Franke, F. Roure, A. Escalona, I. Norton, N. Lebedeva-Ivanova, E. Lundin, A. Dorre, E. Weigelt, D. Mosher, P. Werner, L. Gernigon, J. Shimeld, L. Geoffroy, H. Guan. Мы дискутировали многие вопросы с геологами из компании «Роснефть» и компании Total. В нашей работе принимали участие многие студенты геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Н. Кулюкина, В. Ершова, Д. Игтисамов и др.).

Данная работа базируется в основном на наших опубликованных статьях в высокорейтинговых англоязычных журналах (Nikishin et al., 2018, 2021 a,b,c, 2022), и в журналах Геотектоника (Никишин и др., 2019) и Геодинамика и тектонофизика (Nikishin et al., 2017). В этих статьях дается детальное обоснование нашей геологической модели и приводится много ссылок на разных авторов. Настоящая работа, по сути, является кратким изложением наших публикаций. Здесь мы ограничим количество ссылок на публикации разных авторов и просим читателей смотреть наши статьи для более полного понимания наших работ.

# 1. Краткий геологический обзор

На рис. 1 показаны рельеф региона Арктики и положение основных сейсмических профилей, которые мы использовали. На рис. 2, 3, 4, 5 и 6 показаны основные черты геологического и тектонического строения района Арктического океана.



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). Белая пунктирная линия – положение профиля на рис. 140.

В Арктическом океане выделяется глубоководный бассейн со сложным строением и окружающие его шельфовые моря. В глубоководном бассейне обособляются Евразийский и Амеразийский бассейны, разделенные хребтом Ломоносова. Евразийский бассейн является продолжением Северо-Атлантического океана и по его оси проходит срединно-океанический хребет Гаккеля. Хребет Ломоносова является блоком с континентальной корой (Глебовский и др., 2006; Alvey et al., 2008; Langinen et al., 2009; Petrov et al., 2016; Funck et al., 2022). Согласно геодинамическим реконструкциям земная

кора хребта Ломоносова слагается образованиями тиманского и палеозойских орогенов (продолжением Тиманского, Каледонского и Таймырского(?) орогенов) (Jokat et al., 1992; Poselov et al., 2012; Knudsen et al., 2018; Miller et al., 2018b, 2018a; Nikishin et al., 2014; Rekant et al., 2019).





В Амеразийском бассейне можно выделить два домена: Северо-Амеразийский и Южно-Амеразийский (Nikishin et al., 2014). Южно-Амеразийский домен представлен Канадским бассейном, кора которого слагается тремя основными типами. В центральной зоне на картах гравитационных и магнитных аномалий хорошо видна осевая рифтовая зона. Считается, что в этой зоне бассейна развита типичная океаническая кора, а в краевых частях бассейна выделяется сильно растянутая рифтингом континентальная кора (Mosher et al., 2012; Chain et al., 2016). В некоторых окраинных зонах бассейна предположительно кора сложена веществом серпентинизированной мантии (Mosher et al., 2012; Chain et al., 2016). Время формирования Канадского бассейна также остается дискуссионным: от ранней юры до позднего мела и палеоцена (Grantz et al., 2011; Helwig et al., 2011; Coakley et al., 2016). Северо-Амеразийский домен представлен поднятием Альфа-Менделеева и сопряженными с ним глубокими бассейнами. Между поднятием Альфа-Менделеева и хребтом Ломоносова расположены бассейны Подводников и Макарова. Между поднятием Альфа-Менделеева и Канадским бассейном находятся бассейны Наутилуса, Менделеева и Толля (Чукотской абиссальной равнины). Между хребтом Альфа и Канадским Арктическим Архипелагом выделяется бассейн Стефанссона.

Поднятие Альфа-Менделеева пересекает Амеразийский бассейн и располагается между шельфами Восточно-Сибирско-Чукотского морей России и шельфов островов Канадского архипелага. Поднятие Альфа-Менделеева является структурой с относительно утолщенной корой до 20–30 км (Funck et al., 2011; Alvey et al., 2008; Glebovsky et al., 2013; Gaina et al., 2014; Jokat and Ickrath, 2015; Lebedeva-Ivanova et al., 2019; Petrov et al., 2016; Evangelatos et al., 2017; Kashubin et al., 2018; Struijk et al., 2018; Piskarev et al., 2019). Есть две основные точки зрения на природу коры этого поднятия (Gaina et al., 2014; Pease et al., 2014). Одни авторы считают, что поднятие является меловым океаническим плато с базальтовой корой, образованным над мантийным плюмом (Dove et al., 2010; Grantz et al., 2011; Bruvoll et al., 2012; Funck et al., 2011; Jokat and Ickrath, 2015). Другие исследователи предполагают, что данное поднятие имеет утоненную рифтингом континентальную кору, в которой проявился меловой плюмовый магматизм (Miller and Verzhbitsky, 2009; Døsing et al., 2013; Лаверов и др., 2013; Nikishin et al., 2014, 2021a, b, c; Oakey and Saltus, 2016; Petrov et al., 2016; Kashubin et al., 2018; Верниковский и др., 2014; Jackson and Chain, 2019; Лобковский и др., 2011, 2021а, б). В рельефе дна поднятие имеет сложное строение и в целом представлено чередованием поднятий и впадин.



Рис. 3. Карта рельефа акустического фундамента во временном масштабе. Построена по 2D сейсмическим данным, полученным в разных экспедициях. Для южного края Северо-Чукотского бассейна и южнее поднятия Де-Лонга карта построена по основанию аптских отложений (в этих зонах местами имеются палеозойско-неокомские отложения). По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 4. Карта толщин осадочного чехла (временной масштаб, в секундах двойного времени пробега). Для южного края Северо-Чукотского бассейна и южнее поднятия Де-Лонга карта построена по основанию аптских отложений (в этих зонах местами выделяются палеозойсконеокомские отложения). По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 5а. Карта рельефа акустического фундамента шельфовых морей Восточной Арктики и большей части Арктического океана во временном масштабе. Построена по 2D сейсмическим профилям.



Рис. 56. Карта рельефа акустического фундамента шельфовых морей Восточной Арктики и части Арктического океана в глубинном масштабе. Построена по 2D сейсмическим профилям.

Строение коры бассейнов Макарова и Подводников пока является предметом дискуссий. Одни авторы предполагают, что эти бассейны имеют океаническую кору, возраст которой неизвестен (Alvey et al., 2008; Grantz et al., 2011). Другие авторы считают, что в бассейнах развита утоненная рифтингом континентальная кора (Glebovsky et al., 2013; Jokat and Ickrath, 2015; Shipilov, 2016; Kashubin et al., 2018; Langinen et al., 2009; Лаверов и др., 2013; Nikishin et al., 2021b,c; 2014; Petrov et al., 2016; Piskarev et al., 2019).



Рис. 6. Рельеф акустического фундамента шельфовых морей Западной Арктики. Построена по 2D сейсмическим данным. Максимальные глубины залегания фундамента в Южно-Баренцевском прогибе достигают около 19 км, в Северо-Баренцевском – около 16 км, а в Северо-Карском – около 15–16 км.

Бассейн Толля-Менделеева-Наутилус располагается между Чукотским плато и поднятием Менделеева. Строение его коры является предметом дискуссий. Допускается, что кора бассейна океаническая (Grantz et al., 2011; Hegewald and Jokat, 2013). Однако сейсмические данные по характеру рельефа фундамента и гравитационное моделирование показывают, что кора представлена, вероятно, сильно растянутой рифтингом континентальной корой (Brumley, 2014; Nikishin et al., 2021 b.c; 2014; Chernykh et al., 2016).

Бассейн Стефанссона расположен между хребтом Альфа и Канадским Арктическим Архипелагом. По этому бассейну мало публикаций. Недавно были

опубликованы канадские сейсмические данные по данному региону (Shimeld et al., 2021), которые мы будем широко использовать.

Чукотское плато является поднятием с континентальной корой (Alvey et al., 2008; Gaina et al., 2014; Kashubin et al., 2018; Coakley et al., 2016). На склоне центральной части Чукотского плато отобраны драгой силурийские магматические породы с возрастом около 428 Ma, что свидетельствует о каледонской орогении в районе данного плато (Brumley et al., 2014). Предполагается, что в пределах этого плато развита кора каледонского и более древнего возраста (Brumley et al., 2014).

Шельфовые моря Арктического океана имеют разное геологическое строение. Шельфы Баренцева и северной части Карского морей и шельф севернее Канадских островов и Гренландии имеют фундамент палеозойского и неопротерозойского возрастов. Для этих шельфов характерны осадочные бассейны с палеозойскими рифтами (например, Nikishin et al., 2014; Pease et al., 2014). Юрские и меловые рифты известны для района бассейна Свердруп (Harrison and Brent, 2005; Haldari et al., 2016).

Шельф Аляски узкий. Рядом с ним расположен мезозойский и кайнозойский ороген Брукса.

На шельфе морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского выделено большое количество меловых и кайнозойских рифтов (Drachev et al., 2018, 2010; Franke and Hinz, 2005; Franke, 2013; Малышев и др., 2010; Verzhbitskiy et al., 2012; Ilhan and Coakley, 2018; Nikishin et al., 2014, 2021 b,c; Савин, 2020; Petrov and Smelror, 2021). Многие из этих рифтов субмеридионально простираются до континентальной окраины глубоководного Арктического бассейна, поэтому нет сомнений, что они и связанные с ними глубоководные бассейны формировались в единой геодинамической обстановке.

Северо-Чукотский бассейн является одним из самых уникальных в Арктическом регионе. Мощность осадочного чехла в нем достигает 20–22 км. Бассейн подстилается, вероятно, гипер-растянутой континентальной корой (Kashubin et al., 2018; Petrov and Smelror, 2021; Савин, 2020; Nikishin et al., 2014, 2021a,b).

Здесь мы будем рассматривать в основном часть Арктического океана, которая примыкает к территории России.

# 2. Данные и методы работы

Настоящая работа основана на интерпретации 2D сейсмических данных, полученных в ходе экспедиций Арктика–2011, Арктика–2012, Арктика–2014 и Арктика–2020. Эти экспедиции и их результаты описаны в специальных публикациях (Piskarev et al., 2019; Nikshin et al., 2021a;, Petrov, Smelror, 2021). Мы широко использовали также материалы глубоководных экспедиций с отбором образцов горных пород (экспедиции Арктика–2012; Менделеев–2014 и Менделеев–2016) (Морозов и др., 2013; Верниковский и др., 2014; Kossovaya et al., 2018; Petrov, Smelror, 2021; Skolotnev et al., 2019, Сколотнев и др., 2017, 2022; Nikishin et al., 2021а). Для российских шельфов нами использовались сейсмические данные полученные компаниями МАГЭ (Мурманск), ДМНГ (Южно-Сахалинск), СМНГ (Мурманск), Росгеология, ION-GXT и др. Для российской части шельфа мы использовали все сейсмические данные, имеющиеся в МПР РФ.

Геологическая служба Канады организовала в 2007–2016 годах несколько экспедиций в Амеразийский бассейн. Основная часть данных опубликована (Shimeld et al., 2021; Mosher et al., 2012; Chain et al., 2016; Evangelatos, Mosher, 2016, Coakley et al., 2016; Hutchinson et al., 2017). Вместе с Геологической службой Канады работала Геологическая служба США. Часть работ проводил университет Аляски (Dove et al., 2010; Bruvoll et al., 2010, 2012; Ilhan, Coakley, 2018).

Институт полярных и морских исследований им. А. Вегенера в Германии также организовал несколько экспедиций в Арктический океан. Основные сейсмические данные были опубликованы в (Weigelt et al., 2014, 2020; Jokat, Ickrath, 2015). Гравитационные и магнитные данные проанализированы и представлены в работах (Gaina et al., 2011; Saltus et al., 2011; Døssian et al., 2013; Oakey, Saltus, 2016, Piskarev et al., 2019)

# 3. Краткий обзор существующих представлений о стратиграфии и тектонике Арктики

В России геологией Арктики занимается много институтов и научных коллективов. Основной объем геологических и геофизических работ проводится в Санкт-Петербурге в институтах МПР РФ – ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского (О.В. Петров и др.) и ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга (В.Д. Каминский и др.). Часть работ выполняется в подразделениях Росгеологии (ДМНГ, Южно-Сахалинск, СМНГ, Мурманск и др.). В Российской академии наук работы проводятся в ГИН РАН (Москва, С.Д. Соколов, С.Г. Сколотнев, А.Б. Кузьмичев, М.И. Тучкова и др.), в ИО РАН (Москва, Л.И. Лобковский и др.), в ИФЗ РАН (Москва, Е.В. Артюшков и др.), в ИНГТ СО РАН (Новосибирск, В.А. Верниковский, Д. В. Метелкин и др.), в ИГАБМ СО РАН (Якутск, А.В. Прокопьев), в ПГИ КНЦ РАН (Мурманск, Э.В. Шипилов). Также работы выполняются в университетах: МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, А.М. Никишин, А.В. Ступакова и др.), в СПбГУ (Санкт-Петербург, А.К. Худолей, В.Б. Ершова и др.) и в других организациях. Большой объем работ в российской Арктике провели и продолжают выполнять компании "Роснефть" и "Газпромнефть".

По каждому из вопросов стратиграфии, тектоники и геодинамики, естественно, имеется много разногласий. По линии стратиграфии существует два основных подхода: (1) в основании разреза бассейна Подводников и ряда других залегают отложения верхнего палеозоя (например, В.А. Посёлов, ВНИИОкеангеология, Л.А. Дараган-Сущева и П.В. Рекант, ВСЕГЕИ); (2) в основании разреза бассейна Подводников залегают отложения не древнее апта-альба (например, А.М. Никишин (МГУ им. М.В. Ломоносова), Н.А. Малышев и В.Е. Вержбицкий («Роснефть», Москва), Е.И. Петров (Роснедра, Москва), А.А. Черных (ВНИИОкеангеология). В этой работе мы обосновываем вторую точку зрения. Вопросами сейсмостратиграфии Арктического океана также занимаются специалисты в США, Канаде, Германии, Норвегии, Дании и Китае. Дискуссия о соотношении нашей схемы сейсмостратиграфии и зарубежных схем была нами представлена в (Nikishin et al., 2021b, 2022). В целом, наши схемы примерно совпадают. Наиболее близка к нашей схеме стратиграфии версия немецких исследователей (Weigelt et al., 2020). Основная дискуссия ведется о том, как корректно расчленить разрезы юры, мела и кайнозоя.

По тектонике региона имеется полное согласие всех российских групп в том, что в районе поднятия Альфа-Менделеева и сопряженных глубоководных бассейнов кора континентальная, но в разной степени растянутая и как-то преобразованная (при этом вопрос как утонялась кора, остается дискуссионным; мы являемся сторонниками сравнительно простой концепции и полагаем, что утонение коры было в основном обусловлено растяжением (рифтингом), а также допускаем проявление здесь процессов магматического андерплейтинга и т.д.).

По тектонической истории Арктического океана есть много точек зрения (рис. 7). Коллеги, предлагающие наличие палеозойского чехла, который в Амеразийском бассейне непрерывно переходит в мезозойский, понятной тектонической концепции не предложили. Наиболее простым объяснением, по их мнению, является глубокое погружение древнего континентального массива с палеозойским чехлом. Однако механизм такого погружения не ясен. Известна гипотеза Е.В. Артюшкова (например, Артюшков и др., 2021), согласно которой в миоцене из-за перехода пород габбро в нижней части континентальной коры в более плотные эклогиты, произошло значительное погружение коры (до 3–4 км) в районе бассейна Подводников.

Среди коллег, которые считают, что разрез Арктического океана начинается не ранее, чем с образования пород верхней юры или нижнего мела выделяется как минимум четыре группы. (1) Академическая группа (Л.И. Лобковский, С.Д. Соколов, Э.В. Шипилов) предлагает поэтапное раскрытие Арктического океана, начиная с Канадского бассейна и заканчивая Евразийским бассейном. Они это связывают с «субдукционно-конвективной моделью позднемезозойско-кайнозойской эволюции Арктики» (Лобковский и др., 2021а,б; Соколов и др., 2022). (2) Новосибирская группа (В.А. Верниковский, Д.В. Метелкин и др.) большую роль отводит палеозойской истории Арктики и меловому мантийному плюму (Dobretsov et al., 2013; Vernikovsky et al., 2013; Metelkin et al., 2022; Метелкин и др., 2022). (3) Группа МГУ-Роснефти-Роснедра (А.М. Никишин, Н.А. Малышев, В.Е. Вержбицкий, Е.И. Петров и др.) в основном сосредоточена на выделении последовательности основных тектонических и магматических процессов без обсуждения вызвавших их глобальных причин (Nikishin et al., 2021b,c, 2022). (4) Группа ВНИИОкеангеологии (А.А. Черных, В. Глебовский и др.) также предлагает поэтапное раскрытие Арктического океана с широким проявлением сдвиговой тектоники (Chernykh et al., 2018). В общих чертах Краткий обзор существующих представлений о стратиграфии и тектонике Арктики группы А.М. Никишина, В.А. Верниковского, Л.И. Лобковского и А.А. Черных развивают сходные модели истории Арктического океана, которые являются развитием концепции Н.П. Лаверова и др. (2013).



Рис. 7. Пять наиболее часто обсуждаемых моделей геологической истории Арктического океана.

Рис. 7. Пять наиболее часто обсуждаемых моделей геологической истории Арктического океана.

(A) Классическая ротационная модель. В квадратах: (1) открытие Амеразийского бассейна в юре-мелу (положение оси спрединга показано); (2) открытие Евразийского бассейна в эоцене-квартере; в кружках: (1) главный трансформный разлом вдоль хребта Ломоносова.

(**B**) Модель, в которой поднятие Альфа-Менделеева рассматривается как срединноокеанический хребет; (1) раскрытие Канадского бассейна в юре–мелу, (2) формирование срединно-океанического хребта над мантийным плюмом в мелу, (3) открытие Евразийского бассейна в эоцене–квартере.

(C) Ротационная модель с главным трансформным разломом вдоль края поднятия Альфа-Менделеева. В квадратах: (1) открытие Канадского бассейна в юре-мелу, (2) открытие бассейна Подводников-Макарова в позднем мелу-палеоцене, (3) открытие Евразийского бассейна в эоцене-квартере; в кружках – (2) главный трансформный разлом вдоль края поднятия Альфа-Менделеева.

(**D**) Модель, в которой район поднятия Альфа-Менделеева рассматривается как вулканическая пассивная окраина континента. В квадратах: (1) раскрытие Канадского бассейна с главным трансформным разломом вдоль края Чукотского Бордерленда (хребта Нортхвинд) (цифра 3 в кружке); (2) формирование района поднятия Альфа-Менделеева как пассивной вулканической континентальной окраины с крупномасштабным рифтингом и магматизмом в мелу; (3) открытие Евразийского бассейна в эоцене–квартере.

(E) Модель, в которой Канадский бассейн сформировался в позднем мелупалеоцене. В квадратах: (1) рифтинг и магматизм в районе поднятия Альфа-Менделеева в раннем мелу; (2) открытие Канадского бассейна в позднем мелу–палеоцене с главным трансформным разломом вдоль края Чукотского Бордерленда (хребта Нортхвинд) (цифра 3 в кружечке); (3) открытие Евразийского бассейна в эоцене–квартере.

(**F**) Общая география региона. Модели были опубликованы в (Никишин и др., 2020; Nikishin et al., 2021a)

# 4. Основы сейсмостратиграфии Арктического океана

Основы сейсмостратиграфии, геологической структуры и хроностратиграфии Арктического океана и сопряженных шельфовых бассейнов были предложены нами и аргументированы в серии статей (Nikishin et al., 2014, 2017, 2018; 2021 a,b,c, 2022; Gaina et al., 2015; Никишин и др., 2019, 2020; Родина и др., 2022). Здесь мы лишь кратко сформулируем основные аргументы и выводы с учетом новейших данных. Ссылки в большом количестве на публикации разных авторов приведены в наших статьях, а здесь мы сократили их количество. Кроме того, в этой работе мы не будем вступать в дискуссии с другими авторами. Альтернативные точки зрения по рассматриваемым вопросам представлены, например в (Piskarev et al., 2019; Petrov, Smelror, 2021).

Сейсмическая стратиграфия Амеразийского бассейна в основном основана на следующих данных (Nikishin et al., 2014, 2017, 2019, 2021 a,b,c, 2022): (1) данные бурения по проекту АСЕХ на хребте Ломоносова (рис. 8); (2) результаты корреляции сейсмических горизонтов с возрастами линейных магнитных аномалий в Евразийском бассейне; (3) материалы бурения в Чукотском море (в основном на шельфе Аляски); (4) сведения по истории орогенов (складчатых областей) на островах морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского; (5) данные по возрастам магматических пород на плато Де-Лонга и поднятии Менделеева; (6) данные климатостратиграфии.

В глубоководной части Арктического океана в разрезе мел-кайнозойских отложений нами выделено 8 сейсмических горизонтов.

1. Горизонт с возрастом ±125 Ма (млн. лет назад, возраст приблизительный) отвечает времени начала рифтинга в Чукотском и Восточно-Сибирском морях, проявления магматизма (HALIP, High Arctic Large Igneous Province, магматическая провинция Высокой Арктики) в районе поднятия Альфа-Менделеева и на шельфах Арктического океана (плато Де-Лонга, Земля Франца Иосифа, Шпицберген, южный борт Северо-Чукотского бассейна, острова Арктического Архипелага Канады и др.). Эта граница соответствует примерно поверхности брукского несогласия (Base Torok unconformity или Brookian unconformity) на шельфе Аляски по данным в (Sherwood et al., 2002; Craddock and Houseknecht 2016; Homza and Bergman, 2019). По всей видимости, эта граница также соответствует поверхности предаптского несогласия, установленного в

пределах Южно-Анюйской сутуры (Kuzmichev, 2009; Sokolov et al., 2009) и на острове Котельный (Kos'ko et al., 2002).

2. Горизонт  $\pm 100$  Ма маркирует границу типа рифт-пострифт в Северо-Чукотском бассейне и бассейнах Восточно-Сибирского и Лаптевых морей. Эта граница соответствует примерно кровле сейсмического комплекса SDR (Seaward Dipping Reflectors) с рефлекторами, наклоненными в направлении более глубокой части моря) для поднятия Менделеева и бассейнов Подводников и Толля. Она может быть диахронной (в диапазоне возрастов 100–90 Ма) и соответствует поверхности несогласия (Intra-Early Cenomanian unconformity) в разрезе на шельфе Аляски по данным в (Craddock and Houseknecht, 2016; Homza and Bergman, 2019).

3. Поверхность с возрастом  $\pm 80$  Ma проводится по кровле высокоамплитудных отражений (high-amplitude reflection sequence–2,HARS–2; высокоамплитудная секвенция рефлекторов–2) и соответствует началу регионального униформного погружения бассейна Подводников. Она соответствует, вероятно, началу периода похолодания в Арктике (Schröder-Adams, 2014; Nikishin et al., 2021b) и времени завершения вулканизма на поднятии Альфа-Менделеева (Coakley et al., 2016; Mukasa et al., 2020).

Граница ±66 Ма проявлена в подошве нижнего клиноформного комплекса (lower 4. clinoform complex) Северо-Чукотского бассейна. Она соответствует примерно среднебрукскому несогласию (mid-Brookian, MBU) или несогласию на рубеже мела и палеогена (Cretaceous-Paleocene, KPu) на шельфе Аляски (Sherwood et al., 2002; Craddock and Houseknecht, 2016; Ilhan and Coakley, 2018; Homza and Bergman, 2019). Она также может быть диахронной (от маастрихта и до зеландия). По-видимому, эта граница также может быть синхронна с регионально развитым на северо-востоке Евразии (включая Новосибирские острова и Северо-Восток России) перерывом в седиментации и формированием кор выветривания. Последние датируются в широком диапазоне возрастов близким к рубежу позднего мела и палеоцена (Гриненко и др., 1989; Косько и др., 2003). На кампан-маастрихтское термальное событие (эпизод воздымания ~72±5 млн лет) указывают результаты трекового анализа апатитов по разновозрастным геологическим комплексам о-ва Врангеля (Моисеев и др., 2018а). В последующей публикации по острову Врангеля (Ульянов и др., 2021) говорится о более широком диапазоне трековых возрастов по апатиту – от 75 до 65 млн лет (кампан-даний), что также соответствует времени проявления среднебрукской орогении в конце позднего мела – палеоцене.

5. Граница ±56 Ма соответствует поверхности раздела рифт-пострифтовых отложений в районе хребта Ломоносова. Она отвечает началу спрединга в Евразийском бассейне (breakup unconformity, несогласие раскола литосферы). Эта граница

прослеживается в разрезах на большей части Арктического океана как подошва высокоамплитудных отражений (high-amplitude reflection sequence–1,HARS–1; высокоамплитудная секвенция рефлекторов–1). Она выделена на шельфе Аляски (Homza and Bergman, 2019) и соответсвует началу климатического палеоцен–эоценового температурного максимума (Paleocene–Eocene Thermal Maximum, (PETM)). Граница прослежена на шельфе Аляски (Homza and Bergman, 2019). В ходе наших работ по 2D сейсмическим данным в Восточно-Арктическом регионе обнаружены карбонатные постройки с подошвой на границе 56 Ма, соответствующей уровню РЕТМ. В целом эта граница маркирует начало фазы резкого глобального потепления.

6. Граница ±45 Ма выделяется в кровле высокоамплитудных отражений (highamplitude reflection sequence–1, HARS–1; высокоамплитудная секвенция рефлекторов–1). Она соответствует подошве верхнего клиноформного комплекса (upper clinoform complex) Северо-Чукотского бассейна. Эта граница проявлена, по нашим данным, вблизи кровли карбонатных построек и фиксирует начало похолодания в Арктике. В Евразийском бассейне данная граница хорошо коррелируется с возрастными датировками пород океанической коры, оцененных по данным линейных магнитных аномалий. Она упирается в образования океанической коры с возрастом около 45 Ма (Черных, Крылов, 2011; Nikishin et al., 2014, 2018).

7. Граница ±34 Ма трассируется в кровле хаотического горизонта (chaotic horizon) на шельфах Восточно-Сибирского и Чукотского морей и совпадает со временем палеогеографической перестройки в Амеразийском бассейне. Она соответствует фазе резкого падения уровня моря на рубеже эоцена и олигоцена. Граница совпадает примерно с поверхностью несогласия (Terminal Eocene unconformity) в разрезах на шельфе Аляски по данным (Homza and Bergman, 2019). Возраст ее увязан с возрастами линейных магнитных аномалий в Евразийском бассейне (Nikishin et al., 2018).

8. Граница  $\pm 20$  Ма интерпретируется как поверхность, связанная с региональным эрозионным событием с проявлением многочисленных оползневых процессов на склонах подводных гор. Она соответствует времени начала общеокеанических морских течений (ventilated circulation regime) в связи с открытием глубоководного пролива Фрама и началом единых морских донных течений в Северной Атлантике и в Арктическом океане, как было предположено в (Jakobsson et al., 2007). Граница проходит вблизи основания миоценовых отложений на хребте Ломоносова согласно проекту бурения ACEX по данным (Jakobsson et al., 2007; Backman et al., 2008). Возраст её увязан с датировками линейных магнитных аномалий в Евразийском бассейне (Nikishin et al., 2018).

Основы сейсмостратиграфии Арктического океана

Наша схема сейсмостратиграфии подобна таковой немецких коллег для отложений моложе 56 Ма для района хребта Ломоносова (Weigelt et al., 2020). При корреляции с сейсмическими горизонтами в Канадском бассейне согласно схеме сейсмостратиграфии в (Mosher et al., 2012) имеются неопределенности. Здесь исследователи (Mosher et al., 2012) выделяют границы R40 (примерно граница палеоцена и эоцена, 56 Ма), R30 (примерно на рубеже эоцена и олигоцена, 34 Ма) и R10 (примерно основание миоцена).



Рис. 8. Интерпретация фрагмента сейсмического профиля ARC 14–07 для района хребта Ломоносова. Профиль проходит примерно в 50 км от скважин проекта ACEX. Профиль представлен во временном и глубинном масштабах. Локация профиля показана на карте. Показаны сейсмические горизонты с вероятными возрастами 56 Ма и 45 Ма. Данные по ACEX из (Bruvoll et al., 2010). По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

Для Амеразийского бассейна мы создали по российским данным и по открытым материалам Канады и США сеть композитных сейсмических профилей. На этих профилях мы проследили и увязали все наши сейсмические границы (рисунки 9–23). Работы проводились в проекте Petrel.



Рис 9. А. Интерпретация сейсмического профиля ARC 14–07. Локация профиля показана на карте. 56 Ма, 45 Ма, 34 Ма и 20 Ма – сейсмические горизонты и их вероятные возраста. Положение линейных магнитных аномалий показанло по данным в (Gaina et al., 2011). Данные для ACEX по (Bruvoll et al., 2010). В. Сейсмический профиль и его интерпретация для бассейна Макарова по (Evangelatos, Mosher, 2016). Это профиль примерно параллелен нашему профилю. С. Сейсмический профиль без интерпретации. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

Наиболее хорошо изучено поднятие Менделеева. Ключевыми для данного района являются три группы данных: (1) результаты опробования коренных пород на склонах трех поднятий с помощью специальных подводных аппаратов (Сколотнев и др., 2017, 2022; Skolotnev et al., 2019; Nikishin et al., 2021a, 2022); (2) данные интерпретации сейсмических профилей с выделением сейсмокомплексов типа SDRs; (3) наличие вероятных карбонатных построек.

Сколотнев и др. (2017, 2022) провели аналитические исследования образцов со склонов поднятия Менделеева (рис. 24–29), отобранных в ходе экспедиций Менделеев–2014 и Менделеев–2016. На трех удаленных друг от друга склонах установлено примерно сходное геологическое строение. Акустический фундамент сложен верхнеордовикско– верхнедевонскими шельфовыми карбонатами и кластическими породами. Верхняя часть

склонов представлена песчаниками и вулканическими породами с субгоризонтальным залеганием. Они видны, предположительно, на сейсмических профилях как основание сейсмически различаемого разреза. Песчаники характеризуются карбонатным цементом, их возраст определён микропалеонтологическими методами как баррем–аптский. Судя по микрофауне, песчаники формировались в мелководной морской обстановке. В песчаниках выделены детритовые цирконы с возрастами около 120 Ма. Меловые вулканиты имеют изотопные возраста 100–127 Ма (баррем–альб) с максимумом около 110–114 Ма (апт–альб) (данные С.Г. Сколотнева). Меловые лавы часто имеют повышенную пористость. Вулканические туфы включают класты осадочных пород. В разрезе обнаружена вулканическая бомба с изотопным возрастом 117.3±2.0 Ма (рис. 26). Вулканиты формировались, вероятно, на вулканических островах и в мелководных обстановках. Предварительный анализ показывает, что магматические породы имеют состав от базальтов и трахибазальтов до трахитовых андезитов. Склоны поднятия Менделеева пронизаны интрузиями типа даек и силлов баррем–альбского возраста.



Рис. 10. А. Интерпретация композитного сейсмического профиля (линии ARC 12–06, ARC 14–03, ARC 11–53, ARC 11–28) для района от шельфа Восточно-Сибирского моря до бассейна Амундсена и хребта Гаккеля. Локация профиля показана на карте. Магнитные аномалии и их возраста даны по (Gaina et al., 2011). Показаны сейсмические горизонты и их вероятные возраста. SDW – синтектонический осадочный клин. В. Сейсмический профиль без интерпретации. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 11. А. Интерпретация композитного сейсмического профиля (линии ARC 11–A7 and ARC 11–29) для региона от шельфа Восточно-Сибирского и Лаптевых морей до хребта Гаккеля. Локация профиля показана на карте (**B**). Магнитные аномалии и их возраста показаны по (Gaina et al., 2011). С. Фрагмент карты магнитных аномалий по (Gaina et al., 2011). Черный круг показывает район с яркими магнитными аномалиями, который, вероятно, является областью с интрузиями на сейсмическом профиле. Показаны сейсмические горизонты и их вероятные возраста. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 12. Интерпретация композитного сейсмического профиля (линии ION11–4600, ARC 14–23, and ARC 14–05) для района от шельфа моря Лаптевых до хребта Гаккеля. Локация профиля показана на карте. Показаны сейсмические горизонты и их вероятные возраста. Тектонический уступ Казмина показан по (Nikishin et al., 2018). По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 13. Интерпретация композитного сейсмического профиля (линии ARC 14–22 и ARC 11–27) для района от шельфа моря Лаптевых и вдоль хребта Ломоносова до хребта Гаккеля. Локация профиля показана на карте. Показаны сейсмические горизонты и их возраста. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 14. А. Интерпретация композитного сейсмического профиля, идущего от морей Баренцева и Карского до шельфа Аляски (линии ARC 14–07, ARC 14–06, ARC 14–01, ION 11–1400, ION 11–1100, ION 11–1100, CS1–11200, CS1–16100). Локация профиля показана на карте. Возраста сейсмических горизонтов увязаны с возрастами коры по линейным магнитным аномалиям и с данными бурения на шельфе Аляски. В. Сейсмический профиль без интерпретации. HARS – high-amplitude reflector sequence (секвенция высокоамплитудных рефлекторов). По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 15. Интерпретация композитного сейсмического профиля, идущего от бассейна Амундсена до Северо-Чукотского бассейна (линии ARC 11–28, ARC 14–01, ION 11–4300, ION 11–1400). R/PR – граница рифт-пострифт. Локация профиля показана на карте. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 16. Интерпретация композитного сейсмического профиля, идущего от шельфа Восточно-Сибирского моря в бассейн Подводников (линии ARC 14–06 и MAGE ESS1601). Локация профиля показана на карте. R/PR – граница рифт-пострифт. SDW – syntectonic depositional wedge (синтектонический осадочный клин). По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 17. Интерпретация композитного сейсмического профиля, идущего от хребта Гаккеля в Северо-Чукотский бассейн (линии ARC 14–05, ARC 14–13, ARC 14–03, ARC 14–01). R/PR – граница рифт-пострифт. Локация профиля показана на карте. SDW – syntectonic depositional wedge (синтектонический осадочный клин). По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 18. А. Интерпретация композитного сейсмического профиля (линии ARC 14–39a, ARC 14–06, ARC 14–02) для района от шельфа Восточно-Сибирского моря до хребта Ломоносова и Северного полюса. Локация профиля показана на карте. Показаны сейсмические границы и их вероятные возраста. Фундамент–1 и фундамент–2 – два варианта проведения границы. R/PR – граница рифт-пострифт. В. Профиль без интерпретации. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

В ходе экспедиции Арктика–2012 года с помощью мелкого подводного бурения отобран образец брекчии трахибазальтов, в которых один циркон имеет возраст 127.5±2.7 Ма (Морозов и др., 2013).

Во время экспедиции Арктика–2012 было исследовано 11 полигонов (рис. 30). В трех точках проводилось малоглубинное бурение (до 2 метров при глубинах моря около 4 км, с отбором керн 60, 40 и 15 см, соответственно). В ходе экспедиции в основном выполнялось драгирование пород. Результаты работ показали, что на склонах поднятия

Менделеева преобладают осадочные в основном шельфовые породы с возрастами от силура до перми (Kossovaya et al., 2018; Petrov, Smelror, 2021). Также были отобраны долериты и базальты с изотопными возрастами 471,5±18,1 и 466,9±3,3 Ма (ранний– средний ордовик) (Верниковский и др., 2014). Нами предполагается, что все эти палеозойские породы слагают акустический фундамент поднятия Менделеева. При этом не исключено, что часть образцов является продуктом ледового разноса.



Рис. 19. Интерпретация композитного сейсмического профиля (линии ARC ARC 12–03, ARC 14–01 and ARC 11–053) для района от хребта Ломоносова до Чукотского плато. Локация профиля показана на карте. Показаны сейсмические границы и их вероятные возраста. R/PR – граница рифт-пострифт. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

Микаsa et al. (2020) опубликовали данные по драгированию пород на двух подводных склонах севернее Чукотского Бордерленда. Магматические образования имеют меловые изотопные возраста 118–112, 105–100 и 90–70 Ма. Породы представлены низко-

титанистыми и высоко-титанистыми толеитовыми базальтами. На хребте Альфа были драгированы лапиллиевые туфы с возрастом около 90.40 ± 0.26 Ma (Williamson et al., 2019).



Рис. 20. Интерпретация композитного сейсмического профиля для района от хребта Ломоносова до шельфа Чукотского и Восточно-Сибирского морей. Локация профиля показана на карте. Показаны сейсмические границы и их вероятные возраста. По (Никишин и др., 2019, с изменениями).

Предварительное обобщение данных по возрастам магматических пород для района поднятия Менделеева показывает, что главная эпоха магматизма проявилась в интервале времени около 125–90 (?) Ма, а дополнительная фаза – примерно в интервале 90–80 Ма.



Рис. 21. Интерпретация композитного сейсмического профиля (линии MAGE ESS1620 и ARC 12–03) для района от шельфа Восточно-Сибирского моря до Чукотского плато. Локация профиля показана на карте. Показаны сейсмические границы и их вероятные возраста. R/PR – граница рифт-пострифт. Рифты Восточно-Сибирского моря, бассейна Подводников, поднятия Менделеева и Чукотского плато, вероятно, образуют единую геодинамическую систему и формировались примерно одновременно. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

На сейсмических профилях в пределах поднятия Менделеева хорошо выделяются сейсмокомплексы типа SDRs (Seaward Dipping Reflectors Sequences или последовательности рефлекторов, наклонных в сторону моря) (рис. 31–35). Обычно они выполняют структуры типа полуграбенов. Эти сейсмокомплексы, вероятно, сложены пакетами базальтовых покровов с горизонтами осадочных пород (соотношение вулканитов и осадочных пород может быть разными). На поднятии Менделеева в основании разреза отмечаются гипотетические маломощные вулканические плато типа траппов. Мы

предполагаем, что возраста полученные С.Г. Сколотневым и др., относятся к породам сейсмокомплексов типа SDRs и вулканических плато. По кровле SDR комплекса проходит граница рифт-пострифт. Синрифтовые комплексы поднятия Менделеева имеют, по нашему предположению, возраста около 125–100 Ма (баррем–альб). Интересно отметить принципиальное сходство приведенных определений с апт–альбскими (~ 117–105 Ма) изотопными возрастами постколлизионных плутонов и даек Чукотских мезозод (Катков и др., 2007; Лучицкая и др., 2019). Последние отражают, по мнению многих исследователей, смену режима регионального сжатия на растяжение связанно, в свою очередь, с рифтингом в котловинах Подводников и Макарова (Miller and Verzhbitsky, 2009; Лобковский и др., 2011; Nikishin et al., 2014; Лучицкая и др., 2019).



Рис. 22. Интерпретации композитных сейсмических профилей (**A** и **B**) через районы от бассейна Амундсена до хребта Менделеева и Чукотского плато. **A** – линии ARC11–028, ARC11–053, ARC11–065, ARC12–04, **B** – линии ARC11–029, ARC11–A, ARC11–050, ARC11–065, ARC12–04. Модифицировано по (Nikishin et al., 2014). Это пример первой опубликованной версии нашей интерпретации региональных профилей.



Рис. 23. А. Интерпретация композитного сейсмического профиля (линии ARC 14–09 и ARC 14–03) для района от бассейна Амундсена до шельфа Восточно-Сибирского моря. Локация профиля показана на карте. Показаны сейсмические границы и их вероятные возраста. Трогово-грядовая топография хребта Ломоносова, вероятно, образована кайнозойскими сбросами. В. Профиль без интерпретации. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

Примерно в середине разреза пострифтового комплекса на сейсмических профилях выделяются структуры типа карбонатных построек (рис. 36–41). В нашем коллективе их выделил и специально изучал Н. Posamentier. Известно, что наиболее жарким в кайнозое был климат на рубеже палеоцена и эоцена (PETM, 56 Ma) и в раннем эоцене (Early Eocene climatic optimum). Похолодание наступило около 48–45 Ma (рис. 42). По нашим сейсмическим корреляциям подошве карбонатов как раз отвечает граница 56 Ma. Поверхность кровли карбонатов совпадает с нашей границей 45 Ma.

В палеогеографическом плане SDR комплексы формировались на суше или в условиях мелкого моря (в разрезах имеются красноцветные базальты и вулканические бомбы, а также мелководные осадки). Аргументом является также и то, что все известные в мире SDR комплексы образовались либо на суше, либо в мелководном море. Осадочный комплекс, сформированный в возрастном диапазоне 56–45 Ма, характеризуется, по нашему заключению, наличием карбонатных построек. Это означает, что до времени

56 Ма в регионе было мелководное море с регулярными регрессиями (на сейсмических профилях отмечаются признаки перерывов на относительных поднятиях). В эпоху формирования карбонатов было разноглубинное шельфовое море с мелководно-морскими обстановками на относительных поднятиях. Сейчас для современного поднятия Менделеева характерны типичные глубины океана около 1500 метров. Из этого следует, что основное погружение поднятия Менделеева до больших глубин началось около 45 Ма. Схема хроностратиграфии для поднятия Менделеева показана на рис. 43.



Рис. 24. Концептуальная схема взятия образцов горных пород во время глубоководных геологических экспедиций на поднятие Менделеева в 2014 и 2016 годах. Номера 1, 2, 3 показывают последовательность действий. По (Nikishin et al., 2021а).

К относительно глубоководным бассейнам в северной части Амеразийского бассейна относятся бассейны Подводников, Толля, Менделеева, Наутилус, Стефанссона и Макарова. Канадский бассейн имеет особенное строение, и здесь мы его рассматривать не будем. Бассейны Подводников, Толля и Стефанссона характеризуются сходным строением.



Рис. 25. Локация полигонов во время глубоководных геологических экспедиций на поднятие Менделеева в 2014 и 2016 годах. В нижнем слое показана батиметрическая карта района исследований по модели (Jakobsson et al., 2012). Более детальная батиметрия для полигонов представлена МПР РФ. По (Skolotnev et al., 2019; Nikishin et al., 2021a).


Рис. 26. Фотографии процесса взятия образцов горных пород на подводных склонах поднятия Менделеева. **А** – песчаник (образец 14–09) (78° 10,8' N, 179° 07,0' W, глубина воды 1229 метров). **В** – андезит (14–02) (78° 10,3' N, 179° 07,5' W, глубина воды 1484 метров). **С** – доломит (1601/22) (79° 00,8' N, 174° 43,0' W, глубина воды 2343 метров). **D** – известняк (14–10) (78° 10,9' N, 179° 03,3' W, глубина воды 1282 метров). **E** – андезитовый базальт (1601/14) (79° 01,4' N, 174° 51,6' W, глубина воды 2205 метров). **F** – вулканический туф (1601/25) (79° 00,5' N, 174° 43,4' W, глубина воды 2111 метров). Фотографии сделаны С.Г. Сколотневым с подводного специального аппарата. Данные представлены МПР РФ и частично опубликованы в (Skolotnev et al., (2019). По (Nikishin et al., 2021а).



Рис. 27. Фрагмент сейсмического профиля ARC–12–05 для подводной горы Трукшин. Локация профиля показана на карте кружком. На этих склонах были взяты образцы горных пород С.Г. Сколотневым с помощью специальных подводных аппаратов. Примерное положение взятия проб горных пород показано стрелками. Возраста пород в основном по С.Г. Сколотневу и др. (Skolotnev et al., 2019; Сколотнев и др., 2022). По (Nikishin et al., 2021а, с изменениями).



Рис. 28. Интерпретация фрагмента сейсмического профиля ARC 12–01 для района поднятия Менделеева. Локация профиля показана на карте. Показаны сейсмические горизонты с вероятными возрастами. Уступ на дне океана, вероятно, образован в кайнозое после 45 Ма. На этом склоне были взяты образцы горных пород С.Г. Сколотневым с помощью специальных подводных аппаратов. Данные по возрастам пород по (Skolotnev et al., 2019, Сколотнев и др. 2022). По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 29. Фото одной вулканической бомбы с двух сторон (A, B) (образец 1001/16). Бомба была взята в 2016 году на Центральном полигоне на поднятии Менделеева (локация показана на карте, красный кружек; 79° 01.3' N, 174° 53.3' W, глубина воды 1960 м) с использованием специального подводного оборудования (Skolotnev et el., 2019; Nikishin et al., 2021a). Бомба образована базальтовыми трахиандезитами с 40Ar/39Ar возрастом 117.3 $\pm$ 2.0 Ma (Skolotnev et al., in preparation). Фото С.Г. Сколотнева. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

В бассейне Подводников четко выделяются синрифтовый и пострифтовый комплексы (рис. 44). Синрифтовый комплекс имеет SDR-подобный сейсмический облик, с наклоненными к центру бассейна рефлекторами. В центральной части бассейна выделяется поднятие акустического фундамента (вероятно, континентальный блок). SDR комплексы бассейна Подводников и поднятия Менделеева имеют приблизительно одинаковый возраст. Предполагается, что эти комплексы в основном сложены базальтами. В кровле SDR комплексов выделяются поднятия конической формы, представляющие, возможно, подводные вулканы без признаков эрозии. Высота вулканов достигает 0.6 сек (TWT). Рифтинг и магматизм начались, вероятно, в условиях суши или мелкого моря. К концу формирования синрифтового комплекса глубина моря, судя по высоте вулканов, достигала около 0,2–1 км. Дистальные фации палеоценовых клиноформ Северо-Чукотского бассейна проявлены северо-западнее в бассейне Подводников. Из этого

следует, что в палеоцене бассейн Подводников был относительно глубоководным. В настоящее время глубины здесь превышают 2700 метров.



Рис. 30. Локация полигонов экспедиции Арктика–2012 на поднятие Менделеева. Различные методы взятия образцов показаны цветными кружками. Батиметрия для полигонов показывает детали строения дна. По (Nikishin et al., 2021a, с изменениями).



Рис. 31. Примеры фрагментов сейсмических разрезов для поднятия Менделеева и бассейна Толля. Выделяются сейсмические комплексы типа SDR (вероятных полуграбены заполненные горизонтами базальтов). По (Nikishin et al., 2021а, с изменениями).



Рис. 32. А. Композитный сейсмический профиль для района от хребта Ломоносова до Чукотского плато и его интерпретация (линии ARC 11–053, ARC 14–01, ARC 12–03). В, С, D – фрагменты сейсмических профилей. Сейсмические горизонты показаны вероятными возрастами. Локация показана на карте рельефа фундамента. По (Nikishin et al., 2022 с изменениями).



Рис. 33. А. Композитный сейсмический профиль для района от хребта Ломоносова до Чукотского плато и его интерпретация (линии 11–053, ARC 11–065, ARC 12–04). В, С, D – фрагменты сейсмических профилей. Сейсмические горизонты показаны вероятными возрастами. HARS – high-amplitude reflection sequence. Локация показана на карте рельефа фундамента. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис.34. А. сейсмический профиль для района поднятия Менделеева и его интерпретация (линия 11–053, ARC 12–01). В – фрагмент сейсмического профиля. Сейсмические горизонты показаны вероятными возрастами. Локация показана на карте рельефа фундамента. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).

В разрезе бассейна Толля (с глубиной более 2 км) четко выделяются SDR сейсмические комплексы как на российских, так и на американских сейсмических профилях (Nikishin et al., 2014, 2021a,b; Ilhan, Coakley, 2018; Родина и др., 2022) (рис, 45, 46). В их кровле отмечаются, предположительно, подводные вулканические постройки высотой до 0,5 сек (TWT). Таким образом, к окончанию рифтинга глубина бассейна была не менее 0,5–0,8 км. К северу от бассейна Толля в направлении бассейна Менделеева выделяется продольный бассейнам трог Чарли в виде V-образной палеодолины с посттектоническим заполнением осадками (рис. 47). Мы предполагаем, что этот трог является выражением неудавшейся попытки разрыва литосферы без начала спрединга океанической коры (Nikishin et al., 2021b, 2022).



Рис. 35. Поднятие Менделеева. (А) Фрагмент сейсмического профиля ARC12–04 и (Б) его интерпретация. Локация профиля указана на карте. Поднятие Менделеева имеет осевую линию, у которой направление падения рефлекторов меняется на противоположное. По (Родина и др., 2022).



Рис. 36. Фрагмент сейсмического профиля Арктика–2020 (линия ARC 20–24) и его интерпретация. Секвенция вероятных карбонатов с двумя уровнями предположена в (Posamentier et al., в подготовке). Наблюдаются небольшие карбонатные постройки с типичным диаметром около 100–500 метров и высотой 50–10 метров. Более крупные карбонатные платформы имеют ширину до 3–7 км и толщину до 400 метров. Некоторые из крупных карбонатных построек характеризуются внутренней горизонтальной или агградационной архитектурой. Локация профиля показана кружком. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 37. Фрагмент сейсмического профиля ARC12–03. Видна структура, которая интерпретируется как вероятная карбонатная постройка с возрастом 56–45 Ма. Локация показана красным кружком.



Рис. 38. Композитный сейсмический профиль для района Северо-Чукотского бассейна и поднятия Менделеева (линии ARC 20–24, ARC 12–03, ARC 20–14) и его интерпретация. Уровень вероятных карбонатов на поднятии Менделеева определяется как 56–45 Ма. Локация показана на батиметрической карте. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).

Сейсмостратиграфия Амеразийского бассейна



Рис. 39. Интерпретация композитного сейсмического профиля, идущего от хребта Ломоносова на поднятие Менделеева (линии ARC 14–07, ARC 14–06, ARC 14–02, ARC 14–01, ARC 12–03, ARC 20–24). И фрагменты этого профиля (**A** и **B**). Стратиграфия фрагмента «**A**» увязана со скважинами проекта ACEX (насколько это возможно). Уровень вероятных карбонатов соответствует сейсмической секвенции HARS–1, которая хорошо прослеживается на больших расстояниях.



Рис. 40. Фрагменты сейсмических профилей для поднятия Менделева с возможными карбонатными постройками на относительных поднятиях. Все эти постройки находятся на одном сейсмостратиграфическом уровне между границами 56 и 45 Ма. На карте локация фрагментов профилей показана как **A**, **B**, **C**.



Рис. 41. Вероятные карбонатные постройки по 2Д сейсмическим данным показаны в виде белых кружков на карте рельефа акустического фундамента для района поднятия Менделеева. Карбонатные постройки, вероятно, формировались на относительных поднятиях.



Рис. 42. Схема, показывающая изменения климата в кайнозое (Planke et al., 2021; Westerhold et al., 2020). На этой схеме показана эпоха вероятного формирования карбонатов в Арктике.

Бассейн Стефанссона очень похож по строению с бассейном Подводников. На его бортах отчетливо выделяются SDR комплексы, вероятно, баррем–альбского возраста. Вдоль его оси намечается осевое поднятие фундамента (рис. 48–50). В бассейне Стефанссона выявлены также многочисленные сбросы, которые по данным сейсмических корреляций явно моложе SDR комплексов (рис. 50, 51). Их возраст по нашим данным позднемеловой (около 80–66 Ма).

Бассейн Макарова заметно отличается от бассейнов типа Подводников (рис. 52, 53). Для него пока не обнаружены вероятные SDR комплексы. Граница рифт-пострифт здесь в разрезе пока однозначно не выделена. В синрифтовых отложениях или в их кровле выделяется множество вероятных подводных вулканических построек высотой до 1,2 сек (TWT) без признаков эрозии (рис. 52, 53). Возможно, что к концу эпохи рифтинга глубина моря здесь была не менее 1 км.

Схема хроностратиграфии для бассейна Подводников (и его аналогов типа бассейнов Толля и Стефанссона) показана на рис. 54.



Рис. 43. Хроностратиграфия для поднятия Менделеева. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 44. Бассейн Подводников. (А) Фрагмент сейсмического профиля ARC14–01 и (Б) его интерпретация. Локация профиля указана на карте. В центральной части бассейна выделяется тектонический выступ фундамента. В составе синрифтового комплекса выделяются встречные рефлекторы, похожие на внутренние SDRs. Они наклонены в центр бассейна. По (Родина и др., 2022).



Рис. 45. Бассейн Толля. (А) Фрагмент сейсмического профиля ARC12–03 и (Б) его интерпретация. Локация профиля указана на карте. В составе синрифтового комплекса выделяются рефлекторы – возможно внутренние SDRs. По (Родина и др., 2022).



Рис. 46. Сейсмические профили, на которых были впервые выделены SDRs в Арктике. А. Американский сейсмический профиль для Чукотского плато и бассейна Толля (черная линия на карте). Квадрат **B** на профиле **A** – локация для фрагмента этого профиля. В нижней части **B** – фрагмент профиля (нижняя стрелка на карте) и его интерпретация (Ilhan, Coakley, 2018). Ниже границы Au были выделены SDRs. **C** – фрагмент российского профиля, который параллелен американскому профилю. Верхняя стрелка на карте. Были впервые выделены SDRs (Nikishin et al., 2014).



Рис. 47. А и В – фрагменты сейсмических профилей ARC 12–19 и ARC 12–4 через трог Чарли. Сейсмические горизонты показаны с вероятными возрастами. Локация профилей показана на карте рельефа фундамента синими линиями (профили А и В). Красная пунктирная линия показывает ориентацию трога Чарли. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. А. 48. Композитный сейсмический профиль для бассейна Стефанссона (линии lsl– 1606, lsl–0917, lsl–0918, lsl–0808a, lsl–1108) и его интерпретация. Сейсмические данные по (Shimeld et al., 2021). В и С – фрагменты профилей с интерпретацией. Сейсмические горизонты показаны с вероятными возрастами. Локация профилей показана на карте рельефа фундамента. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 49. А. Композитный сейсмический профиль для бассейна Стефанссона (линии lsl– 1606, lsl–0915, lsl–0914, lsl–0913, lsl–0808a, lsl–1108) и его интерпретация. Сейсмические данные по (Shimeld et al., 2021). В и С – фрагменты профилей с интерпретацией. Сейсмические горизонты показаны с вероятными возрастами. Локация профилей показана на карте рельефа фундамента. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 50. А. Композитный сейсмический профиль для бассейна Стефанссона (линии lsl-1017, lsl-1107) и его интерпретация. Сейсмические данные по (Shimeld et al., 2021). В и С – фрагменты профилей с интерпретацией. Сейсмические горизонты показаны с вероятными возрастами. Локация профилей показана на карте рельефа фундамента. Четко видна серия сбросов, которые явно моложе SDRs, при этом сбросы, вероятно, древнее 66 Ма. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 51. Композитный сейсмический профиль для района бассейна Стефанссона и Канадского бассейна (линии Isl1108, Isl0808a, Isl0925, Isl0926, Isl0927, Isl0811b, Isl0811a) и его интерпретация. Сейсмические данные по (Shimeld et al., 2021). Сейсмические горизонты показаны с вероятными возрастами. Локация профилей показана на карте рельефа фундамента. Сбросы рифта 78N явно моложе комплекса SDRs. Возраст сбросов около 80–66 Ма. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 52. А. Композитный сейсмический профиль от хребта Ломоносова до поднятия Менделеева (линии ARC 14–06, ARC 14–02, ARC 11–065, ARC 12–04) и его интерпретация. В, С, D – фрагменты профиля с интерпретацией. Сейсмические горизонты показаны с вероятными возрастами. Оконтурены вероятные захороненные меловые вулканы. Локация профиля показана на карте рельефа фундамента. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 53. Фрагмент сейсмического профиля ARC 14–06, показанного на рис. 52. Профиль пересекает бассейн Макарова и его южный борт. А. Интерпретация профиля. V-образный трог расположен в центре бассейна, он интерпретируется как возможный рифтовый бассейн с возрастом более 66 Ма. Красным цветом показаны вероятные вулканические постройки с возрастом более 80 Ма. В. Выравнивание профиля на границу 66 Ма. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 54. Хроностратиграфия для поднятия Альфа-Менделеева и бассейнов Подводников и Стефанссона. Составили А.М. Никишин и Е.А. Родина.

## 6. Сейсмостратиграфия и хроностратиграфия хребта Ломоносова

Хребет Ломоносова изучался многими исследователями, например (Piskarev et al., 2019; Petrov, Smelror, 2021). Мы, в основном, будем следовать нашим работам (Nikishin et al., 2018, 2021b) и результатам исследований наших немецких коллег (Weigelt et al., 2014, 2020). Согласно сейсмическим данным, для хребта Ломоносова характерны многочисленные рифты. Для восточного склона типичны рифты мелового возраста (вероятно, апт–альбские, древнее 100 Ма) (рис. 55). Эти рифты синхронны с рифтами бассейна Подводников. Для западного склона синрифтовые отложения выделяются под границей 56 Ма (рис. 56). Вероятно, эти палеоценовые рифты предшествовали началу раскрытия Евразийского бассейна.

Региональные пострифтовые отложения залегают выше границы 56 Ма. Они изучены в разрезах скважин проекта ACEX. В них традиционно выделяются два комплекса: отложения древнее и моложе 45 Ма. В интервале между горизонтами 45 Ма и 18 Ма отмечаются признаки эрозионного события, возраст и масштабы которого дискуссионны. Для отложений с возрастами 56 Ма – 50 Ма типичны биокремнистые осадки. Окончание накопления кремнистых осадков было примерно на рубеже 45 Ма (Backman et al., 2008). Отметим, что время накопления биокремнистых осадков на хребте Ломоносова совпадает с эпохой формирования карбонатных построек на поднятии Менделеева. После рубежа 45 Ма в регионе началось похолодание климата и на хребте Ломоносова в основном формировались глинистые и глинисто-алевритовые осадки. Для эпохи между 45 Ма и 20 Ма было характерно формирование сбросов.

Схема хроностратиграфии для хребта Ломоносова показана на рис. 57.

60



Рис. 55. Фрагмент композитного сейсмического профиля (линии ARC 11–053, ARC 14–01). Локация профиля показана на карте. На склоне хребта Ломоносова выделяется синрифтовая толща Террасы Ломоносова. По (Никишин и др., 2019).



Рис. 56. Интерпретация сейсмических профилей ARC 14–23 и ARC 14–22 для южной части хребта Ломоносова и сопряженной части шельфа. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 57. Хроностратиграфия для хребта Ломоносова. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

# 7. Сейсмостратиграфия и хроностратиграфия Евразийского бассейна

Сейсмостратиграфия Евразийского бассейна разрабатывалась многими исследователями. Здесь мы будем опираться на результаты наших исследований (Nikishin et al., 2014, 2018, 2021), которые в целом согласуются с результатами работ многих других исследователей, например (Глебовский и др., 2006; Черных, Крылов, 2011; Piskarev et al., 2019; Petrov, Smelror, 2021).

Для Евразийского бассейна характерны линейные магнитные аномалии (например, Глебовский и др., 2006). Каждая из аномалий имеет свой возраст согласно принятой международной магнитостратиграфической шкале. По аномалиям определяется возраст океанической коры, это стандартная процедура (рис. 58). Возраст коры Евразийского бассейна омолаживается симметрично от континентальных окраин к осевому спрединговому хребту Гаккеля с его четко выраженной современной рифтовой долиной (рис. 59, 60).



Рис. 58. Интерпретация сейсмического профиля ARC–028. Показано положение линейных магнитных аномалий и их возраста. На этих данных базируется стратификация Евразийского бассейна. Магнитные аномалии по (Глебовский и др., 2006; Gaina et al., 2011). По (Nikishin et al., 2014).

Сейсмостратиграфия и хроностратиграфия Евразийского бассейна

В Евразийском бассейне по возрастам магнитных аномалий мы выделили домены океанической коры с возрастами 56–45 Ма, 45–34 Ма, 34–20 Ма, 20–0 Ма. Соответственно, на коре с возрастом, например, 56–45 Ма могут залегать только более молодые осадки. Также мы использовали данные климатостратиграфии. Наш сейсмический горизонт 45 Ма соответствует кровле пакета сейсмофаций с яркими рефлекторами (HARS–1). Выше залегают более прозрачные по облику сейсмофации. Эту границу мы связываем со временем резкого климатического изменения в виде похолодания. Это событие задокументировано в разрезах скважин проекта ACEX (Backman et al., 2008) и имеет возраст около 45 Ма. Соответственно, в Евразийском бассейне мы выделяем сейсмокомплексы с возрастами 56–45 Ма, 45–34 Ма, 34–20 Ма и 20–0 Ма (рис. 61). Осадки с возрастами 56–45 Ма характеризуются на профилях яркими рефлекторами. Возможно, в их составе имеются кремнистые осадки. Осадки моложе 45 Ма представлены в основном глинами с подчиненной ролью алевритового материала.

В бассейне Нансена объем отложений с возрастом моложе 20 Ма намного больше, чем в бассейне Амундсена. Это естественно объясняется тем, что в бассейн Нансена в неогене–квартере осадки транспортировали все крупнейшие реки Сибири (рис. 61).



Рис. 59. Сейсмические профили через хребет Гаккеля и их интерпретация. По (Nikishin et al., 2018, 2021a, с изменениями).



Рис. 60. Подводные профили и данные многолучевой съемки для Евразийского бассейна и рифтовой долины Гаккеля. А. Подводные профили (предварительная полевая обработка). В. Профили многолучевой съемки для района хребта Гаккеля. В нижнем слое показана международный батиметрический грид для Евразийского бассейна (IBCAO, Jakobsson et al., 2012). Отметим, что новые данные существенно уточняют рельеф дна океана. С. Карта, на которой показаны разные типы полученных данных. По (Nikishin et al., 2021а, с изменениями).



Рис. 61. А. Топографическая карта для Арктического региона, на которой показаны неогенчетвертичные речные системы. В. Интерпретация сейсмического профиля ARC 14–07для Евразийского бассейна. Локация профиля показана желтой линией на карте. Хорошо видна асимметрия Евразийского бассейна. Топография по (Jakobsson et al., 2012). Дельта долины Святой Анны является гипотетической из-за ограниченного количества сейсмических данных. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

## 8. Сейсмостратиграфия и хроностратиграфия шельфовых бассейнов

## Восточной Арктики

К Восточной Арктике относятся бассейны моря Лаптевых (Усть-Ленский, Восточно-Анисинский, Новосибирский и др.), Восточно-Сибирского моря, Северо-Чукотский, Южно-Чукотский и др. Все они были нами охарактеризованы ранее (Nikishin et al., 2014, 2021 a,b,c, 2022). Здесь мы лишь кратко суммируем основные результаты и положения.

В фундаменте данного региона можно выделить южную и северную области. В направлении от Аляски к западу, севернее острова Врангеля, в районе острова Жохова и до дельты реки Лена по сейсмическим данным прослеживается взбросо-надвиговый пояс Жохов-Врангель-Геральд (ЖВГ). К югу от моря Лаптевых этот пояс переходит во фронтальный взбросо-надвиговый пояс Верхоянской складчатой системы (детали географического положения области сочленения этих складчатых систем пока остаются дискуссионными). К югу от взбросо-надвигового пояса ЖВГ развит мезозойский фундамент, сформировавшийся в результате складчатости в раннем мелу перед аптом (рис. 62). Соответственно, в этой области все доаптские отложения входят в состав акустического фундамента.



Рис. 62. Тектоническая схема фундамента Арктического региона. По (Nikishin et al., 2014, с изменениями).

Севернее взбросо-надвигового пояса выделяется область с позднедокембрийским (тиманским) и раннепалеозойским фундаментом, который локально обнажен на островах Де-Лонга. Для этой области также типичны и предкарбоновые (элсмирские) деформации. Этот континентальный блок Н.С. Шатский назвал Гипербореей, а Л.П. Зоненшайн – ядром континента Арктида. В пределах этого блока на сейсмических профилях локально наблюдается полого деформированный палеозойско–неокомский осадочный чехол.

Осадочные бассейны Восточной Арктики мы разделим на следующие группы: (1) пояс краевых прогибов Врангеля-Жохова; (2) Северо-Чукотский бассейн; (3) бассейны Новосибирский и Восточно-Анисинский (вместе – Восточно-Лаптевским), бассейн Восточно-Сибирского моря, Южно-Чукотский бассейн и др.; (4) Усть-Ленский бассейн (или Западно-Лаптевский); (5) бассейн Умкилир (севернее острова Врангеля).

### 8.1. Жоховско-Северо-Врангелевский погребенный краевой прогиб

По разным геофизическим данным пояс взбросо-надвигов и краевых прогибов Жохов-Врангель-Геральд был давно намечен многими исследователями, например (Пущаровский, 1960, 1976; Drachev et al., 2010, 2018). Позднеюрско-неокомский краевой прогиб севернее острова Врангеля был выделен по сейсмическим данным ДМНГ (Nikishin et al., 2014, 2021b). Его наличие было подтверждено новыми сейсмическими данными (Скарятин и др., 2020 а, б). В районе острова Жохова (острова арх. Де-Лонга) нами по сейсмическим данным был выделен Жоховский краевой прогиб (Nikishin et al., 2014, 2017, 2021b; Попова и др., 2018) (рис. 63). Возраст отложений в этом прогибе предполагается позднеюрско-барремский. Это основано на том, что комплекс краевого прогиба перекрывается условно аптскими отложениями. К северу от острова Врангеля на комплексе отложений краевого прогиба по сейсмическим данным и материалам магниторазведки выделяется область базальтовых траппов типа Де-Лонга (Скарятин и др., 2020a, б; Nikshin et al., 2021 b,c). Эти траппы имеют, вероятно, апт-альбский возраст по аналогии с базальтами островов Де-Лонга. Под комплексом пород краевого прогиба почти согласно залегают осадочные отложения карбона-средней юры. Этот комплекс отложений давно был выделен геологами ДМНГ (Петровская, Савишкина, 2014) и нами (Nikishin et al., 2014; 2021b). Детально он описан в работах (Скарятин и др., 2020a, б) (рис. 64).



Рис. 63. Сейсмические профили через краевой прогиб Жохова. (А) Модифицировано по (Nikishin et al., 2014). (В) Фрагмент профиля ES1\_16ES21 (МАГЭ). По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

## 8.2. Северо-Чукотский бассейн

Северо-Чукотский бассейн мы рассмотрим отдельно из-за его уникальности. Для этого бассейна характерна аномально большая толщина отложений (20 и более км) (Piskarev et al., 2019; Petrov, Smelror, 2021) (рис. 5б). В его центральной и северной частях

фундамент представлен гипер-растянутой континентальной корой толщиной около 10 или менее км (вопрос о природе фундамента является дискуссионным) (Piskarev et al., 2019; Petrov, Smelror, 2021). Для Северо-Чукотского бассейна выделяются следующие сейсмокомплексы (мегасеквенции или тектоностратиграфические единицы) (Nikishin et al., 2014, 2021b, 2022) (рис. 65–77): (1) синрифтовый с полуграбенами и признаками комплексов SDRs и базальтовых траппов; (2) пострифтовый с горизонтальным залеганием осадков; (3) нижний клиноформный комплекс; (4) верхний клиноформный комплекс; (5) верхний комплекс без типичных клиноформ.



Рис. 64. Сейсмический профиль для Чукотского моря и его интерпретация. Локация профиля показана на карте. РU – Пермское Несогласие, JU – Юрское Несогласие, LCU – Нижнемеловое Несогласие, BU – Брукское Несогласие, CU – Сеноманское Несогласие, MBU – Среднебрукское Несогласие, InEoU – Внутриэоценовое Несогласие, NU – Неогеновое Несогласие, mNU – Средненеогеновое Несогласие, v – толща с вероятными вулканитами. По (Скарятин и др., 2020, с упрощением).

Нижний сейсмокомплекс выделяется только на отдельных сейсмических профилях. На южном борту бассейна севернее острова Врангеля различаются, предположительно, базальтовые траппы, а под ними интерпретируются многочисленные интрузии (рис. 78, 79, 80). На северном борту бассейна намечаются системы полуграбенов (рис. 73), имеются признаки сейсмических комплексов, сходных с SDRs. На севере бассейна в его основании самые нижние видимые на профилях осадки налегают на южное окончание поднятия Менделеева (рис. 67, 71, 72). Все синрифтовые и вулканические образования мы датируем

в диапазоне возрастов 125–100 Ма и предполагаем, что основная фаза рифтинга и магматизма проходила синхронно с развитием поднятия Менделеева.



Рис. 65. А. Композитный сейсмический профиль для района бассейна Арктической Аляски (линии usgs-r-8, usgs-6-74, usgs-6D-74, usgs-4-74, usgs-GM-5S, usgs-GM-5D, usgs-GM-4D, usgs\_HW81-24, usgs\_HW81-11, usgs\_WB-558, and usgs-71GSG-G-88. Сейсмические данные Геологической службы США. Для нашей интерпретации были использованы данные в (Houseknecht., 2019a, 2019в). В. Локация сейсмического профиля. С. Фрагмент сейсмического профиля с примерным положением на региональном профиле (A) по (Houseknecht, 2019b). (Houseknecht, 2019b). LCU – Нижнемеловое Несогласие, PSU – Pebble Shale Unit (единица пеббле шеил), GRZ – Gamma-Ray Zone (зона с гамма-лучами); конденсированный разрез между LCU и GRZ. D. Композитный разрез для Северо-Чукотского бассейна. Е. Локация разреза. Этот разрез также показан на рис. 66. Сравнение профилей показывает, что Северо-Чукотский бассейн и бассейн Арктической Аляски (Умиэт) имеют разное геодинамическое происхождение. Северо-Чукотский бассейн это бассейн пассивной континентальной окраины Арктического океана, а бассейн Арктической Аляски – это краевой прогиб орогена Брукса. На Аляске близким аналогом Северо-Чукотского бассейна континентальной окраины Бофорта (Beafort Rifted Margin), который пока плохо изучен. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).


Сейсмостратиграфия и хроностратиграфия шельфовых бассейнов Восточной Арктики

Рис. 66. А. Интерпретация композитного сейсмического профиля (линии ARC 14–01, ION 11–1400, ION 11–4200, ION 15–2000, CS1–11200, CS1–16100) для района Чукотского моря. Локация профиля показана на карте. Показаны сейсмические границы и их вероятные возраста. Для трога Ханна показано положение скважин, использованных при интерпретации. Для интерпретации использовались данные в (Sherwood et al., 2002; Kumar et al., 2011). Пред-аптское (BU) и пред-палеоценовое (MBU) несогласия могут быть трассированы с шельфа в сторону глубоководного океана. В. Сейсмический профиль без интерпретации. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 67. Интерпретация композитного сейсмического профиля, идущего от бассейна Подводников в Северо-Чукотский бассейн (линии ARC14\_P01, ARS10F24, ION11\_4200A). Локация профиля показана на карте. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 68. Выравнивание на горизонт 45 Ма (**A**) и 66 Ма (**B**) для южной части сейсмического профиля представленного на рис 67. Два крупных клиноформных комплекса четко выделяются. В стороны бассейна Подводников виден переход в глубоководные осадки. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 69. Фрагмент сейсмического профиля представленного на рис 67. Синрифтовые и пострифтовые комплексы четко выделяются в бассейне Подводников. R/PR (рифт-пострифт) граница в бассейне Подводников трансформируется в границу, соответствующую подошве акустического фундамента в Северо-Чукотском бассейне. Вулканоподобная структура выделяется в верхней части синрифтового комплекса бассейна Подводников. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

Нижний пострифтовый комплекс характеризуется горизонтальным залеганием слоев. В восточной части бассейна в этом комплексе выделяется линзовидное осадочное тело толщиной около 5-6 сек (TWT) (рис. 71). Это тело мы интерпретируем как возможный дельтовый комплекс отложений. В центральной части Северо-Чукотского бассейна пострифтовые отложения залегают непосредственно на породах акустического фундамента и на продолжение структур поднятия Менделеева (поднятие Кучерова). Мы предполагаем, что в центре бассейна все синрифтовые отложения были гипер-растянуты и вошли в состав пород акустического фундамента. Нами также не исключается наличие пологого срыва (детачмента) вблизи подошвы пострифтовых отложений. В составе последних выделяется пакет ярких рефлекторов, который мы регионально картируем на сейсмических профилях как сейсмический пакет HARS-2. Мы предполагаем, что этот соответствует осадочному комплексу с пакет рефлекторов каким-то особым литологическим составом. Эту особенность комплекса мы связываем с проявлением позднемелового потепления, которое закончилось около 80 Ма. На этом основании внутри нижнего пострифтового комплекса мы выделяем маркирующую границу 80 Ма, которая соответствует одновозрастной сейсмической границе в разрезе Амеразийского бассейна.

Кровлей нижнего пострифтового комплекса является основание нижнего клиноформного комплекса (66 Ma). Таким образом, возраст нижнего пострифтового комплекса датируется нами как 100–66 Ma.



Рис. 70. А. Композитный сейсмический профиль для района шельфа Восточно-Сибирского и Чукотского морей, бассейна Подводников, поднятия Менделеева и бассейна Толля и его интерпретация (линии ION12\_1400, ION11\_1400, 5AR, ARC14\_P01, ARC12\_03). Локация профиля показана на карте. В. Интерпретация без картинки сейсмического профиля. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

Нижний клиноформный комплекс хорошо выделяется на многих сейсмических профилях как непрерывная клиноформная последовательность (секвенция). Его типичная временная толщина около 3–4 сек (TWT). В целом для комплекса типична проградация клиноформ в направлении более глубоководного моря. Это комплекс интерпретируется как дельтовый с переходом от континентальных и мелководно-морских отложений к осадкам дельты на палеосклоне. К северу дельтовые осадки сменяются относительно глубоководными турбидитовыми образованиями (Nikishin et al., 2014, 2021b; Фрейман и др., 2019; Скарятин и др., 2020а, б; Ставицкая и др., 2020). Граница в подошве

клиноформного комплекса условно датируется как 66 Ма и соответствует поверхности несогласия MBU (Mid-Brookian Unconformity) в разрезах на шельфе Аляски. Мы предположительно прослеживаем эту границу от разрезов скважин на шельфе Аляски по данным в (Ilhan, Coakley, 2018). Там также развит клиноформный комплекс.



Рис. 71. А. Композитный субширотный сейсмический профиль для района Северо-Чукотского бассейна (линии ION 12–1400, ION 11–1400) и его интерпретация. В – фрагмент профиля с выравниванием на горизонт 80 Ма. С – тот же фрагмент без интерпретации. Сейсмические горизонты показаны с вероятными возрастами. Локация профиля показана на карте рельефа фундамента. МаВ – Манский бассейн, NMB – Северо-Мелвиллский бассейн. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).

Начало формирования клиноформного комплекса мы связываем с воздыманием территории современной Аляски и других соседних регионов в ходе Средне-Брукского орогенеза (Mid-Brookian orogeny). Этот орогенез проходил с конца позднего мела и в палеоцене. Граница 66 Ма может быть диахронной, примерно, в интервале 70–60 Ма. В верхней части нижнего клиноформного комплекса прослеживается граница 56 Ма. Она прослеживается в Северо-Чукотский бассейн из бассейна Подводников. Кровлей нижнего клиноформного комплекса является граница 45 Ма, которая также выделяется и транслируется из бассейна Подводников.



Рис. 72. А. Композитный сейсмический профиль для района Северо-Чукотского бассейна и поднятия Менделеева (линии 12–03, ARC 14–01, ARS10F24, ION 11–4300, ION 11–1300) и его интерпретация. В – фрагмент профиля и его интерпретация. С – фрагмент профиля с выравнивание на горизонт 80 Ма. Сейсмические горизонты показаны с вероятными возрастами. R/PR – граница рифт-пострифт. Локация профиля показана на карте рельефа фундамента. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).

Между нижним и верхним клиноформными комплексами обособляется отчетливая граница, выше которой по разрезу отмечается резкое отступление отложений клиноформного комплекса в сторону суши. Н. Posamentier назвал эту границу «a major transgressive surface» (главная трансгрессивная поверхность) или «major flooding surface» (главная поверхность затопления). Это было связано, по нашему мнению, не с эвстатическим событием, а с кратковременным тектоническим этапом быстрого погружения. В разрезе бассейна Подводников эта граница соответствует кровле сейсмического пакета HARS–1 (45 Ma), который прослеживается и в разрезе Северо-Чукотского бассейна. В региональном плане тектоническое событие 45 Ma имеет огромное значение с точки зрения региональной перестройки палеогеографии и палеотектоники. Так, рубеж 45 Ma соответствует началу перехода «нормального» спрединга на хребте Гаккеля в режим «ультрамедленного» спрединга (например, Глебовский и др., 2006;

Nikishin et al., 2018). Верхний клиноформный комплекс характеризуется отчетливой проградацией клиноформ в направлении более глубоководной части моря. Его верхней границей является горизонт 20 Ма, который прослеживается из бассейна Подводников. Граница 34 Ма проходит внутри непрерывного клиноформного комплекса и также протягивается из бассейна Подводников.

Горизонт 20 Ма фиксирует окончание накопления клиноформного комплекса. Осадки выше этого горизонта примерно равномерно перекрывают все структуры. Горизонт 20 Ма маркирует также подводные эрозионные события.

Схема хроностратиграфии Северо-Чукотского бассейна приведена на рис. 81.



Рис. 73. А. Композитный сейсмический профиль для района Северо-Чукотского бассейна и поднятия Менделеева (линии ARC 12–01, ARC 20–14, ARC 20–16, ARC 20–11). В и С – детали профилей с интерпретацией. Сейсмические горизонты показаны с вероятными возрастами. Локация профиля показана на карте рельефа фундамента. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 74. Интерпретация композитного сейсмического профиля, идущего шельфа Чукотского моря до бассейна Подводником (линии ARC12\_03, ION11\_4200A). Локация профиля показана на карте. Граница рифт-пострифт (R/PR) бассейна Толля, вероятно, совпадает с основанием видимого осадочного чехла Северо-Чукотского бассейна. Из этого следует, выровненное дно Северо-Чукотского бассейна является границей типа рифт-пострифт (зеленая линия). По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 75. А. Композитный профиль для Северо-Чукотского бассейна и бассейна Толля. Правая часть – наши данные (линия ION 11–4200А), левая часть – сейсмические данные из (Ilhan, Coakley, 2018) в нашей интерпретации. В – деталь сейсмического профиля с интерпретацией из (Ilhan, Coakley, 2018). Сейсмические горизонты показаны с вероятными возрастами. R/PR – граница рифт-постифт. Локация профиля показана на карте рельефа фундамента. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 76. Композитный сейсмический профиль и его интерпретация для района сочленения Северо-Чукотского бассейна и поднятия Менделеева (линии ARC 12–03, ARC 14–01, ARC 20–14). Сейсмические горизонты обозначены вероятными возрастами. R/PR – граница рифт-пострифт. Локация профиля показана на карте рельефа фундамента. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис.77. Пример интерпретации сейсмических данных для бассейна Подводников. А. Интерпретация сейсмического профиля (сделана в МГУ им. М.В. Ломоносова). Ключевым является выделение синрифтового и пострифтового комплексов. В. Фрагмент этого сейсмического профиля с рифт-пострифтовой границей. Синрифтовый комплекс имеет яркие рефлекторы, наклоненные в одном направлении. С. Скоростная модель для этого профиля по данным сейсмозондирования методом отраженных и преломленных волн гидроакустических буев (сделана в ВНИИОкеангеология). Интерпретация двух групп очень сходна. Синрифтовый комплекс имеет относительно повышенные сейсмические скорости. Мы предполагаем, что синрифтовый комплекс частично сложен базальтами. **D**. Локация профиля. Голубые кружки – местоположения гидроакустических буев и их номера. По (Nikishin et al., 2021а, с изменениями).



Рис. 78. Интерпретация композитного сейсмического профиля (линии ION11\_4200A, ION15\_2000, ION15\_4225). Локация профиля показана на карте. На профиле видны яркие рефлекторы ниже границы 125 Ма. Это могут быть интрузии в палеозойских и доаптских отложений мезозоя. Над границей 125 Ма хаотическая сейсмическая фация может быть вулканитами. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 79. Фрагмент сейсмического профиля для Северо-Чукотского бассейна. Локация профиля показана на карте. Звезда показывает вероятное положение магнитного тела близкое к 700 метрам. Вероятно, мы видим вулканический комплекс и интрузии. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 80. Интерпретация фрагмента сейсмического профиля. Локация профиля показана на карте. Ряд ярких сейсмических аномалий может быть интерпретировано как интрузии. Все интрузии расположены ниже границы 125 Ма. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Хроностратиграфия для Северо-Чукосткого бассейна

Рис. 81. Схема хроностратиграфии для Северо-Чукотского бассейна.

## 8.3. Бассейны, сходные с бассейнами Восточно-Сибирского моря

К этому типу бассейнов относятся бассейны Новосибирский и Анисинский (вместе – Восточно-Лаптевский), бассейны Восточно-Сибирского моря (включая Манский и Северо-Мелвиллский бассейны, рис.82), Дремхедский, Пегтымельский и Южно-Чукотский. Эти бассейны охарактеризованы нами в серии работ (Nikishin et al., 2014, 2017, 2018, 2021b). Они также рассмотрены, например, в (Piskarev et al., 2019; Petrov, Smelror, 2021). Южно-Чукотский бассейн детально охарактеризован в (Verzhbitskiy et al., 2012; Skaryatin et al., 2021). Эти бассейны объединяет то, что они формировались на месте аптальбских континентальных рифтов (125–100 Ma), которые образовывали единую рифтовую систему. Эти рифты одновозрастны рифту Северо-Чукотского бассейна, однако, масштабы растяжения в них были менее значительными.

Сейсмостратиграфия рассматриваемых бассейнов основана на подходе, аналогичном вышеописанному для Северо-Чукотского бассейна. На некоторых сейсмических профилях для Анисинского бассейна и бассейнов плато Де-Лонга и его континентальной окраины в основании синрифтового комплекса видны вероятные трапповые комплексы и интрузии под ними (рис. 83-86). Возможно, что эти магматические комплексы одновозрастны трапповым образованиям на плато Де-Лонга (около 128-100 Ма, с наиболее вероятным возрастом около 103-109 Ма; литературные и наши данные). Граница типа рифт-пострифт хорошо выделяется на сейсмических профилях в районе плато Де-Лонга. Мы ее датируем как 100 Ма (рис. 83). После рубежа 100 Ма все рассматриваемые бассейны по-разному формировались в последующие этапы развития, сопровождавшиеся часто перерывами в седиментации и фазами деформаций. Например, кайнозойские фазы сбросообразования задокументированы на острове Бельковский (Кузмичев и др., 2013). В южной части в бассейнах типа Южно-Чукотского доминировала континентальная седиментация, а в районе Восточно-Анисинского бассейна и бассейнов северного края плато Де-Лонга – морская. Корреляция сейсмических границ между разными бассейнами этого типа очень затруднена и требует специальных исследований.

83



Рис. 82. Интерпретация фрагмента сейсмического профиля для Восточно-Сибирского моря (линия ION12\_1400). Наблюдается крупная континентальная рифтовая система с серией фаз рифтинга между 125 Ма и 45 Ма и моложе. Точно фазы рифтинга корректно оценить сложно. Весь композитный профиль показан на рис 70. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 83. А. Фрагмент сейсмического профиля для Анисинского бассейна. Локация профиля показана на карте. В. Фрагмент этого профиля. Можно видеть вероятный вулканический комплекс и интрузии. Вулканиты расположены на дне рифтового бассейна. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 84. Интерпретация сейсмических профилей для шельфа Восточно-Сибирского моря (район поднятия Де-Лонга). А. Композитный сейсмический профиль от шельфа Восточно-Сибирского моря (поднятие Де-Лонга) в бассейн Подводников (линии МАГЭ ESS1611 и МАГЭ ESS1601). В. Увеличенный фрагмент профиля МАГЭ ESS1611. С. Сейсмический профиль МАГЭ ESS1625. Локация профилей показана на карте. По (Nikshin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 85. Сейсмические профили с интерпретацией и их детали для восточной части поднятия Де-Лонга. Проект Арктика–2020. **А**, **В**, **С** – линии lines ESS 16–07, ARC 20–11, ARC 20–15. Сейсмические горизонты показаны с вероятными возрастами. S/R – синрифт. Локация профилей показана на карте рельефа фундамента. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 86. Поднятие Де-Лонга. Фрагмент сейсмического профиля MAGE–2016 ESS1607. Локация профиля указана на карте в виде звездочки. В составе акустического фундамента выделяются ярко-амплитудные субгоризонтальные рефлекторы – возможно, это дорифтовые платобазальты. По (Родина и др., 2022).

#### 8.4. Западно-Лаптевская группа бассейнов

Западно-Лаптевская группа бассейнов включает Усть-Ленский бассейн в море Лаптевых и бассейны на суше (Усть-Янский, Омолойский, Быковский, Кунгинский, Кенгдейский, Согинский (Сого)) и в пределах континентальной окраины моря Лаптевых (бассейн Лаптевых-Гаккеля). На суше грабены выполнены в основном континентальными эоценовыми и олигоценовыми отложениями. Для Согинского грабена характерны вероятно, верхнепалеоценовые континентальные, угленосные отложения. Сейсмостратиграфия Усть-Ленского бассейна является предметом дискуссий. На севере Усть-Ленского бассейна на континентальной окраине Таймыра на сейсмических профилях четко выделяется граница типа рифт-пострифт (рис. 87). Вполне возможно, что она является границей break-up (раскола литосферы) для раскрытия Евразийского бассейна (около 56 Ма). Ниже этой границы в Усть-Ленском бассейне развиты синрифтовые комплексы палеоцена. Начало рифтинга пока определено неоднозначно. Это может быть начало палеоцена или поздний мел. Наличие апт-альбского рифтового комплекса под палеоцен-эоценовым остается неопределенным. Ниже границы 56 Ма на сейсмических

профилях наблюдается большое количество аномалий сейсмической записи. интерпретируемых нами как интрузии (дайки и силлы). На континентальной окраине Евразийского бассейна у моря Лаптевых на сейсмических профилях примерно на уровне 56 Ма выделяются пакеты ярких рефлекторов. Вероятно, они маркируют горизонта базальтовые трапповые комплексы. Не исключено, что между шельфом моря Лаптевых и Евразийским бассейном развивалась вулканическая пассивная континентальная окраина. В пределах Усть-Ленского рифта после палеоценового рифтинга и вплоть до современности отмечалось несколько фаз сбросообразования. Корректную корреляцию событий пока сложно восстановить (рис. 88, 89). На севере Усть-Ленского бассейна ортогонально ему депоцентр бассейна Лаптевых-Гаккеля. простирается глубокий По результатам корреляции сейсмических данных предполагается, что основная фаза формирования бассейна происходила, вероятно, в эоцене синхронно с началом раскрытия Евразийского бассейна. Возможно, что этот бассейн является присдвиговым типа пулл-апарт.



Рис. 87. Интерпретация сейсмического профиля МАГЭ ESS1409. Локация профиля показана на карте. Граница типа рифт-пострифт или breakup (раскола литосферы) хорошо наблюдается (56 Ма). Ряд ярких секущих слоистость сейсмических аномалий может быть интерпретировано как интрузии. Пакет ярких рефлекторов у акустического фундамента может быть интерпретирован как вероятные вулканиты. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 88. Интерпретация композитного сейсмического профиля (линии ION11–1700, ION11– 4600 and ARC 14–23) для района шельфа моря Лаптевых и вдоль склона хребта Ломоносова. Локация профиля показана на карте. Показаны сейсмические горизонты с их вероятными возрастами. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 89. Интерпретация композитного сейсмического профиля (линии ION 11–1700, ION 11–4600 и ARC 12–16) для района шельфа моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. Локация профиля показана на карте. Показаны сейсмические горизонты с их вероятными возрастами. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

#### 8.5. Бассейн Умкилир и одновозрастные разломные системы.

Севернее острова Врангеля на южном борту Северо-Чукотского бассейна выделяется бассейн Умкилир (по чукотскому названию острова Врангеля) (рис. 90, 91). По нашей интерпретации сейсмических данных главная фаза рифтинга в этом бассейне была в интервале времени между 45 Ма и 34 Ма. В плане он имеет примерно ромбическую форму и наиболее вероятно его присдвиговое происхождение по механизму пулл-апарт.

На огромной территории бассейнов Восточно-Сибирского и Северо-Чукотского морей выделяется большое количество малоамплитулных сбросов (рис. 92, 93). Максимальные амплитуды смещений по основной части сбросов составляют 100-200 мс и лишь у единичных разломов достигают амплитуд 300-400 мс (TWT) (рис. 93). Усреднённый азимут простирания разломов в бассейне Восточно-Сибирского моря около 335-345°, а в около 350°. Вероятно, все эти сбросы являются Северо-Чукотском бассейне присдвиговыми, оперяющими основные более протяженные разломы. Предполагается, что одна из важнейших зон сдвигов имеет субширотное простирание, и она хорошо выражена в гравитационных и магнитных аномалиях (рис. 94) (Старцева, Никишин, 2022). Азимуты простирания малоамплитудных сбросов расположены под углом 55-65° к оси вероятной региональной зоны сдвига, прослеживаемой на карте магнитных аномалий. Длина правосторонней сдвиговой транстенсионной зоны не менее 1300 км, а ширина составляет около 500 км (рис. 95). Мы предложили назвать эту разломную зону Умкы (по чукотскому названию белых медведей). В пользу правосдвиговой (транстенсионной) природы субширотной зоны Умкы могут свидетельствовать данные геолого-структурных исследований на острове Врангеля. В результате проведенных наблюдений были зафиксированы многочисленные молодые (предположительно, кайнозойские) мезоструктуры правосдвиго-сбросовой кинематики, наложенные на плоскости взбросонадвигов и кливажа (субширотного простирания, преимущественно южного падения), относящихся к более раннему (раннемеловому?) коллизионному структурному плану (Вержбицкий и др., 2015).

Следует отметить, что в районе поднятия Менделеева эпоха сбросообразования проявилась около 45–34 Ма, которая во многом и обусловила горст-грабеновый рельеф поднятия. Событие около 45 Ма охватило большую часть Арктики, и оно явно имело тектоническую природу (Nikishin et al., 2014, 2021b,c). В разрезе Восточно-Сибирского моря под границей 34 Ма регионально прослеживается сейсмический горизонт с хаотической волновой картиной (мы его называем «хаотический горизонт»). В американской части Чукотского моря также выделяются рифтовые бассейны с началом растяжения около 45 Ма (бассейн Хоуп и др.). В низах разреза бассейна Хоуп известны вулканиты с возрастами 42,3 и 40, 7 Ма (Bird et al., 2017).

90



Рис. 90. Интерпретация регионального сейсмического профиля 5AR для района Чукотского моря. Локация профиля показана на карте. Показаны сейсмические горизонты и их вероятные возраста. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 91. Интерпретайия композитного сейсмического профили для района бассейна Умкилир. Локация профиля показана на карте. Показаны сейсмические горизонты и их вероятные возраста. По (Никишин и др., 2019).



Рис. 92. Интерпретация сейсмического профиля ION 12–1350 для района шельфа Восточно-Сибирского моря. Хорошо выделяется система малоамплитудных сбросов, которые пересекают сейсмическую граница 45 Ма, но не пересекают границу 34 Ма. Вероятно, разломы образуют транстенсионную систему с временем формирования около 45–34 Ма. Составили К.Ф. Старцева и А.М. Никишин.



Рис. 93. Фрагмент сейсмического профиля ION 12–1400 (А) и выравнивание на границу 45 Ма (Б). Локация профиля показана на карте. Большинство малоамплитудных сбросов моложе 45 Ма, Они пересекают эту границу, но не пересекают границу 34 Ма. По (Никишин и др., 2019 с изменениями).



Рис. 94. На карте магнитных аномалий гравитационного поля показано положение главного правостороннего сдвига Умкы с предполагаемым возрастом 45–34 Ма. Составили К.Ф. Старцева и А.М. Никишин. Карты магнитных и гравитационных аномалий по данным ВНИИОкеангеология.



Рис. 95. Примерные границы расположения разломов транстенсионного пояса Умкы. Составили К.Ф. Старцева и А.М. Никишин.

# 9. Структуры сжатия в бассейнах Восточно-Сибирского и Чукотского морей

Для осадочных бассейнов этих морей характерны структуры сжатия, которые пока слабо изучены. Крупный взброс ограничивает западный борт Дремхедского бассейна (рис. 96). Этот взброс наследует раннемеловой взбросо-надвиговый пояс Врангеля-Геральда. Возраст его по данным интерпретации сейсмических материалов определяется неоднозначно. Главная фаза деформаций приходится на интервал времени между 66 Ма и 56 Ма, что соответствует в широком понимании среднебрукской орогении. В более позднее время, в интервале примерно между 45 Ма и 34 Ма (средний-поздний эоцен и, возможно, позже) вдоль плоскости этого разлома реализовывались обратные, сбросовые смещения.



Рис. 96. А. Интерпретация композитного сейсмического профиля (линии ДМНГ\_ES10Z05A, SC-90-20с). Локация профиля показана на карте. Хорошо виден надвиговый пояс Врангеля-Геральда. Надвигание началось до 66 Ма. Коллапс орогена с формирование сбросов произошел до 45 Ма. В. Фрагмент профиля. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

Структуры сжатия в бассейнах Восточно-Сибирского и Чукотского морей

В Пегтымельском бассейне прослеживается отчетливо выраженная инверсионная структура (рис. 97). Здесь по нашим данным фазы тектонических деформаций проявились до 34 Ма и в интервале между 34 и 20 Ма.

Классические инверсионные структуры выделяются в Южно-Чукотском бассейне (Малышев и др., 2010; Ихсанов, 2014; Verzhbitskiy et al., 2012; Skaryatin et al., 2021). Считается, что здесь было несколько фаз сжатия: на рубеже мела и палеогена (региональное событие 66 Ма), в середине эоцена и в середине миоцена.



Рис. 97. А. Интерпретация фрагмента сейсмического профиля ION15\_4410 для района Пегтымельского бассейна, расположенного южнее надвигового пояса Жохов-Врангель-Геральд. Бассейн образовался не раньше апта. В. Выравнивание на горизонт 20 Ма. Рифтовый бассейн испытал фазы инверсии перед 34 Ма и перед 20 Ма. Отметим, что для этого района датировка возрастов сейсмических горизонтов не однозначная. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

# 10. Климатостратиграфия Арктики по сейсмическим данным

Данных по палеоклимату Арктики пока мало. Результаты бурения по проекту ACEX показали, что теплый климат (greenhouse) был примерно в период 56–45 Ma (Stein, 2019). Также предполагается, что теплый климат был и в позднем мелу. В мелу–олигоцене Арктический океан был практически полуизолирован от Мирового океана. Осадконакопление в нем во многом определялась климатом. В более холодные времена преобладала глинистая седиментация, а в более теплые – могла происходить кремнистая или карбонатная седиментация. На сейсмических профилях выделяется два уровня сейсмических пакетов с яркими рефлекторами: HARS–1 и HARS–2 (рис. 98, 99).



Рис. 98. Возможные климатические (литологические) сейсмические границы в разных бассейнах Арктического океана. А. Фрагменты сейсмических профилей. В. Вероятные сейсмические комплексы с аномальным климатическим потеплением или похолоданием. По (Nikishin et al., 2011b, с изменениями).

Климатостратиграфия Арктики по сейсмическим даннывм

Горизонт HARS-1 имеет возраст 56-45 Ma, а HARS-2 – около 100-80 Ma. Для горизонта HARS-1 доказано присутствие кремнистой седиментации на хребте Ломоносова. Нами также установлено наличие вероятных карбонатных построек на поднятии Менделеева примерно этого же возраста. Для характеристики горизонта HARS-2 данные бурения отсутствуют. Горизонты HARS-1 и HARS-2 регионально прослеживаются в разных бассейнах Арктики и контролируют секвенции, которые формировались в условиях жаркого климата.

Мы сопоставили выделенные нами кайнозойские сейсмические границы с кривыми, характеризующими различные палеообстановки. Границы 56 Ма, 45 Ма, 34 Ма и 20 Ма совпадают с рубежами проявления глобальных экологических событий (рис. 99, 100).



Рис. 99. Глобальные климатические события в Арктическом океане в мелу-кайнозое. А. Стратиграфическая шкала (Ogg et al., 2016). В. Основные климатические события в Арктике в кайнозое (Stein, 2008). С. Глобальные климатические события в мелу (O'Brien et al., 2017). D. Глобальные климатические эпохи (O'Brien et al., 2017). Е. Меловые климатические события в Арктическом регионе (Galloway et al., 2015; Herrle et al., 2015; Rogov et al., 2017; Schröder-Adams, 2014; Schröder-Adams et al., 2014). Горизонтальные пунктирные линии с возрастами являются сейсмическими горизонтами. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

### Климатостратиграфия Арктики по сейсмическим даннывм



Рис. 100. Сводка по климатической истории и колебаний уровня моря для кайнозоя (Miller et al., 2020). Горизонтальные линии – наши сейсмические границы. Эти границы можно коррелировать с глобальными климатическими событиями и с изменениями уровня моря.

Палеогеографические карты составлялись нами первоначально на современной географической основе. Затем с использованием программы GPlates были проведены палеотектонические реконструкции. Они выполнены С.И. Фрейманом и С. Gaina (Freiman et al., 2018) на концептуальной основе геологической истории Арктики, предложенной А.М. Никишиным и др. (Nikishin, Malyshev, Petrov, 2014). Большая часть выполненных реконструкций для поздней юры – кайнозоя была опубликована (Nikishin et al., 2021с). Для более древних этапов геологической эволюции арктического региона карты публикуются впервые. Основой для их составления (палеокарты для кембрия–ранней юры) были данные Роснедра, доступные во ВСЕГЕИ в виде опубликованных отчетов. Кроме этого, широко использовались также публикации отечественных геологов.

Мы провели реконструкцию для Арктики примерно для временного рубежа палеозоя и триаса и на эту карту нанесли возраста пород предполагаемого фундамента (то есть по сути главной эпохи формирования континентальной коры) (рис. 101).



Рис. 101. Основные провинции фундамента Арктического региона на палеотектонической реконструкции для границы перми и триаса (~250 Ma). Ключевые ссылки: 1 – V. A. Nikishin et al., 2017; 2 – V. A. Nikishin et al., 2017; 3 – Knudsen et al., 2018; 4 – Rekant et al., 2019; 5 – Skolotnev et al., 2019; 6 – Ershova et al., 2016a; Prokopiev et al., 2018; 7 – Akinin et al., 2015; 8 – Brumley et al., 2015; O'Brien et al., 2016; 9 – Gottlieb et al., 2018; Luchitskaya et al., 2017; 10 – Gottlieb et al., 2018; 11 – Hoiland et al., 2018. По (Nikishin et al., 2014, 2021с, с изменениями).

В Арктическом океане по всем имеющимся данным отсутствуют древние кратоны. Большая часть территории представлена образованиями орогенных поясов тиманского (неопротерозойско–кембрийского), каледонского (ордовик–девонского) и позднепалеозойского возрастов. В районе северной Канады и Аляски развит элсмирский (поздний девон–начало карбона) фундамент. В последнее время появились данные о проявлении элмирской орогении также в северной части шельфа Восточной Арктики, что задокументировано на островах Врангеля (Вержбицкий и др., 2015; Соколов и др., 2017; Моисеев и др., 2018б) и Котельный (Prokopiev et al., 2018).

# 11.1. Кембрий

Реконструкции для кембрия носят пока очень гипотетический характер. В настоящее время установлено, что ороген Тиманид занимал огромные территории. Он прослежен от Тимана и до Северной Земли, а также от Новосибирских островов до Аляски.

Кембрийские или неопротерозойские орогены окружали Сибирскую платформу с запада, севера и востока (рис. 102).



Рис. 102. Основные тектонические области для кембрия на современной географической основе. Данные интерпретируются не однозначно.

#### 11.2. Ранний ордовик

В Западной Арктике главным событием в раннем ордовике было формирование рифтовых систем в Тимано-Печорском и Северо-Карском бассейнах. Рифтинг происходил на краю континента и носил, скорее всего, задуговой характер. Фрагменты предполагаемой вулканической дуги сохранились на острове Октябрьской Революции (Малышев и др., 2012; В.А. Никишин, 2013; Nikishin et al., 2014). В течение раннего ордовика преобладала терригенная седиментация (рис. 103).



Рис. 103. Палеогеографическая реконструкция для раннего ордовика. По (В.А. Никишин, 2013; Nikishin et al., 2014, с добавлениями и изменениями). В раннем ордовике важным событием было формирование рифтовых систем в Тимано-Печорском бассейне (вместе с бассейном Печорского моря) и в Северо-Карском бассейне. Предполагается, что рифтинг имел задуговой характер.

## 11.3. Поздний девон

В Западной Арктике в позднем девоне важнейшее событие было связано с формированием во фране Восточно-Баренцевского мегабассейна в результате континентального рифтинга с гипер-растяжением континентальной коры. Синхронно с этим событием рифтинг проявился и на арх. Новая Земля и на Севере Урала. Базальтовый магматизм широко проявился также в Тимано-Печорском регионе и на Кольском полуострове. Причина образования Восточно-Баренцевского мегабассейна достоверно не

установлена. По одной из версий он образовался над крупным мантийным плюмом, а по другой – этот бассейн формировался как задуговой над зоной субдукции Уральского океана (рис. 104).



Рис. 104. Палеогеографическая реконструкция для позднего девона, франа. Главным событием в позднем девоне было формирование рифтового Восточно-Баренцевского мегабассейна. Вероятно, рифтинг имел задуговую природу.

#### 11.4. Ранний карбон

В раннем карбоне (визе-серпухов) в Западной Арктике было несколько важных событий. В Норвежской части Баренцева моря широко проявился рифтинг в условиях растяжения и сдвиго-растяжения. Сбросовые движения возобновились и в Восточно-Баренцевском мегабассейне.

В Таймыро-Североземельской области происходила коллизионная орогения с образованием горной области. В северной части Восточно-Баренцевского мегабассена это обусловило формирование в раннем карбоне дельтовых и турбидитовых комплексов за счет транспорта материала с новообразованных гор. На шельфах большей части Восточно-Баренцевского мегабассейна в целом преобладало карбонатное осадконакопление (рис. 105, 106).



Рис. 105. Палеогеографическая реконструкция для раннего карбона, визе-серпухова. Важным событием в раннем карбоне был коллизионный орогенез на Таймыре. При этом, дельтовотурбидитовые комплексы формировались на севере Восточно-Баренцевского мегабассейна.



Рис. 106. Палеотектоническая реконструкция для раннего карбона. Зеленым показаны карбоновые рифтовые бассейны. Синим – Восточно-Баренцевский бассейн с позднедевонским рифтингом.

К настоящему времени сохраняется неопределенность по каменноугольной истории Таймыра. Время и характер коллизионных процессов здесь являются предметом дискуссий (например, Metelkin et al., 2005; Vernikovsky et al., 2020; Khudoley et al., 2018; Курапов, 2022).

## 11.5. Поздняя пермь

Для Дальнего Востока и Арктики, помимо отмеченных выше данных, широко использовались публикации А.С. Бякова и М.И. Тучковой (например, Бяков, 2010; Tuchkova et al., 2014).

Основным событием в поздней перми являлась коллизия и орогенез в пределах огромной области Урала-Западной Сибири и Таймыра-Северной Земли (рис. 107, 108).



Рис. 107. Палеогеографическая карта для поздней перми на современной географической основе. Важным событием было формирование огромного коллизионного орогена в поясе Урал-Западная Сибирь, Южная Кара и Таймыр-Северная Земля. По восточному краю Восточно-Баренцевского мегабассейна формировались дельтово-турбидитовые комплексы. Цифры в белых прямоугольниках – пики возрастов детритовых цирконов (наши данные).

С уральской орогенией связано формирование многочисленных инверсионных антиклинальных поднятий в Тимано-Печорского бассейне и Восточно-Баренцевском мегабассейне. Территория Пай-Хоя-Новой Земли была в то время краевым прогибом перед коллизионным орогеном. Также продолжалось развитие Предтаймырского краевого прогиба. Основные реки текли с Урало-Западносибирского и Таймырского орогенов в

сторону Восточно-Баренцевского мегабассейна. В Восточно-Баренцевском бассейне формировались турбидитовые конуса выноса, связанные с крупными дельтами. В пределах же Восточной Сибири основные реки текли в направлении Верхоянской континентальной окраины.

Главной неопределенностью для этого отрезка геологической истории остается вопрос о восточном продолжении орогена Таймыра. Для его решения надо, по-видимому, продолжить исследования Верхояно-Чукотской области.



Рис. 108. Тектоническая реконструкция для поздней перми.

## 11.6. Ранний триас

Основой для составления палеокарты для раннего триаса также были данные Роснедра, которые доступны во ВСЕГЕИ в виде опубликованных отчетов и публикации отечественных геологов. Для района Чукотки и о. Врангеля широко использовались публикации М.И. Тучковой (Tuchkova et al., 2014, 2020).

Основным событием в раннем триасе было формирование базальтовых траппов в Восточной Сибири и на Таймыре. Одновременно на территории Западной Сибири и современного Южно-Карского бассейна формировалась гигантская континентальная рифтовая система с вероятным крупномасштабным магматизмом. Вся область Западной и Восточной Сибири была сушей. Это связано с образованием под Сибирью позднепермскораннетриасового мантийного суперплюма. Базальтовый магматизм проявился также в районе Полярного Урала, на Чукотке, Новосибирских островах и, возможно, локально на Новой Земле (рис. 109, 110).



Рис. 109. Палеогеографическая карта для раннего триаса на современной географической основе. Важным событием был подъем территории Западной Сибири, Южной Кары и Восточной Сибири. Крупные реки транспортировали обломочный материал в Восточно-Баренцевский мегабассейн. В итоге бывший глубоководный бассейн был полностью заполнен осадками. Широко проявился трапповый магматизм и континентальный рифтинг. Цифры в белых прямоугольниках – пики возрастов детритовых цирконов (наши данные).

В пределах Баренцева моря в раннем триасе были заполнены осадками почти все ранее существовавшие глубоководные бассейны. Это объясняется тем, что очень крупные реки Западной Сибири транспортировали огромные объемы терригенного материала в бассейны Баренцева моря. Главным его источником для района Баренцева моря были уралиды (включая Таймыр). При этом роль Восточно-Европейской платформы как источника обломочного материала практически отсутствовала, за исключением Балтийского щита в качестве второстепенного источника сноса (Соловьев и др., 2015; Khudoley et al., 2019; Голованов и др., 2022).
Территория поднятия Альфа-Менделеева-Де-Лонга в Восточной Арктике представляла собой, вероятно, сушу. Реки с этого поднятия транспортировали обломочный материал в сторону континентальных окраин Чукотки и Аляски.



Рис. 110. Тектоническая реконструкция для раннего триаса. Условные обозначения, как и на предыдущем рисунке.

# 11.7. Поздний триас

В позднем (или среднем-позднем) триасе главным тектонически событием был рост пояса поднятий Урал–Новая Земля–Таймыр. Синхронно с этим в обстановке сжатия в Тимано-Печорской и Баренцевской областях началось формирование антиклинальных поднятий. Вследствие роста горных поднятий в регионе поменялась система речных систем. Основные реки текли с данного горного пояса (с Урала, Новой Земли и Таймыра) в область Баренцева моря. Западно-Сибирский бассейн стал практически изолированным. Реки здесь текли только вдоль Енисей-Хатангского прогиба в район моря Лаптевых.

Позднетриасовое горообразование было внутриплитным (внутриконтинентальным) событием. Вероятной причиной сжатия и воздымания являлось формирование активной континентальной окраины по северному краю Монголо-Охотского океана в полосе от Забайкалья и западнее в сторону Монголии и Китая (рис. 111, 112).



Рис. 111.Палеогеографическая карта для позднего триаса на современной географической основе. Важным событием был внутриплитный орогенез в полосе от Полярного Урала и Новой Земли до Таймыра. Цифры в белых прямоугольниках – пики возрастов детритовых цирконов (наши и литературные данные).



Рис. 112. Тектоническая реконструкция для позднего триаса. Условные обозначения, как и на предыдущем рисунке.

#### 11.8. Ранняя юра

В ранней юре в геттанге-синемюре сохранилась примерно такая же ситуация как и позднем триасе. На месте Баренцева моря и Южно-Карского региона преобладали аллювиальные равнины, которые иногда затоплялись морем. Основные речные системы начинались с пояса поднятий Урал–Новая Земля–Таймыр. Для области Баренцева моря основным источником обломочного материала были уралиды (и их продолжение до Таймыра). Аналогичные обстановки были характерны и для области Южно-Карского бассейна (рис. 113).



Рис. 113. Палеогеографическая карта для ранней юры (геттанг-синемюр). Важным событием было продолжение внутриплитного орогенеза в полосе от Полярного Урала до Таймыра. Цифры в белых прямоугольниках – пики возрастов детритовых цирконов (наши данные).

# 11.9. Поздняя юра

Детально реконструкция этого описана в (Nikishin et al., 2021с). В поздней юре в киммеридже-титоне в Западной Арктике доминировали шельфовые обстановки с преобладанием глинистой седиментации. На этом фоне происходил рост поднятий (Новая Земля, Урал, Тиман). Для поздней юры также характерен рост антиклинальных поднятий (валов) в Южно-Карском и Енисей-Хатангском прогибах. Речные системы брали свое

начало на Таймыре, на поднятии Ломоносова (или севернее) и на Новой Земле. Локальный снос осадков происходил с Сибирской и Восточно-Европейской платформ.

В Восточной Арктике важным событием было формирование окраинноконтинентального вулканического пояса Уда-Уяндина-Святой Нос-Южная Чукотка. В тылу этого пояса формировалась система флишевых прогибов: Иньяли-Дебинский, Полоусный, Ляховский и Раучуанский. Область Восточно-Арктических морей была в целом приподнятой с затоплением лишь в периоды возможных морских трансгрессий. С этой области обломочный материал поступал в морской шельфовый бассейн Арктической Аляски.

В пределах современного Канадского бассейна в юре проявился континентальный рифтинг.

Рост антиклинальных валов в Енисей-Хатангском и Баренцево-Карском регионах был связан с региональным сжатием. Это сжатие, вероятно, было обусловлено формированием активной континентальной окраины в Забайкальско-Становом регионе на краю Монголо-Охотского океана (рис. 114, 115).



Рис. 114. 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 (наши данные). По (Nikishin et al., 2021с, с изменениями). Цифры в белых прямоугольниках – пики возрастов детритовых цирконов (наши и литературные данные).

Для поздней юры основные вопросы связаны с событиями в Верхояно-Чукотском регионе и в Арктике. Для их решения необходимы новые данные по этим регионам. В частности, для Чукотки было обосновано проявление существенного юрского этапа структурообразования в условиях сжатия, т.е. предшествовавшего основному коллизионному этапу в неокоме (Голионко и др., 2018). Роль и значение этого тектонического события в юре для палеогеодинамических реконструкций Арктики еще предстоит оценить.



Рис. 115. Тектоническая реконструкция для поздней юры, киммериджа-титона (157–145 Ма) Кинематическая реконструкция для 150Ма. Условные обозначения как и на предыдущем рисунке. 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. Фиолетовые линии показывают очертания некоторых террейнов, даны их названия. По (Nikishin et al., 2021с, с изменениями).

#### 11.10. Ранний мел, неоком

Детально реконструкция этапа описана в (Nikishin et al., 2021с). В неокоме (берриасе-барреме) произошла значительная перестройка палеогеографии. В Верхояно-

Чукотском регионе активно формировался ороген. На его окраине образовался пояс краевых прогибов: Предверхоянский, Жоховский и Северо-Врангельский. В готеривебарреме проявилась главная фаза раскрытия Канадского океанического бассейна. Территория современных областей Альфа-Менделеева-Ломоносова была, вероятно, общирным поднятием и источником обломочного материала, в том числе для района Баренцева моря.

В бассейнах Западной Арктики и Западной Сибири преобладала седиментация с формированием клиноформ. Для Баренцевоморских бассейнов основной источник обломочного материала находился на севере. Реки также текли с поднятия Полярный Урал–Новая Земля–Таймыр. В бассейнах Западной Арктики и Западной Сибири в неокоме шел рост многочисленных антиклинальных поднятий (валов) в обстановках сжатия и сдвиго-сжатия. Это сжатие было связано, вероятно, с коллизионными процессами в Монголо-Охотской и Верхояно-Чукотском орогенах (рис. 116, 117).

Для раннего мела основным вопросом остается время раскрытия Канадского бассейна.



Рис. 116. Палеогеографическая карта для неокома (берриаса-баррема) на современной географической основе. Географическая основа – геологическая карта Арктики (Harrison et al., 2011). По (Nikishin et al., 2021с, с изменениями).



Рис. 117. Тектоническая реконструкция для неокома (берриаса-баррема) (145–125 Ма). Кинематическая реконструкция для 150Ма. Условные обозначения как и на предыдущем рисунке. 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. Фиолетовые линии показывают очертания некоторых террейнов, даны их названия. По (Nikishin et al., 2021с, с изменениями).

# 11.11. Ранний мел, апт-альб

Детально реконструкция этого этапа описана в (Nikishin et al., 2021c). Примерно на рубеже баррема и апта произошла значительная перестройка тектонического и палеогеографического планов (рис. 118, 119). В Верхояно-Чукотской области происходил коллапс орогена и здесь проявился наземный посторогенный вулканизм. На гигантской территории начался базальтовый вулканизм и внедрение многочисленных интрузий. На Шпицбергене, Земле Франца Иосифа, Де-Лонга, в районе бассейна Свердруп и севернее острова Врангеля формировались базальтовые плато (трапповые области). В районе Баренцева моря в чехол внедрилось большое количество интрузий (рис. 120).



Рис. 118. Палеогеографическая карта для раннего мела, апта-альба, (125–100 Ма) на современной географической основе. Географическая основа – геологическая карта Арктики (Harrison et al., 2011). Цифры в белых прямоугольниках – пики возрастов детритовых цирконов (наши данные); данные для острова Свердруп из (Ershova et al., 2019). По (Nikishin et al., 2021с, с изменениями).

Крупномасштабный магматизм и рифтинг начались в области поднятий Альфа-Менделеева. Рифтинг охватил и территории восточной Арктики (от моря Лаптевых до Чукотского моря). В бассейнах Западной Арктики на рубеже баррема и апта прекратился рост антиклинальных валов. Здесь формировались аллювиальные равнины с проявлением этапов трансгрессии моря. В апте-альбе сформировалась новая система рек. Реки с Верхояно-Чукотской области текли в сторону Баренцева и Карского морей, а реки с Чукотки текли в направлении бассейна Арктической Аляски (рис. 118, 119).

Реконструкция для апта-альба является одной из ключевых. Для понимания времени начала образования бассейнов Чукотского и Восточно-Сибирского морей важным является реконструкция истории формирования поднятия Менделеева на основе новых данных.

115



Рис. 119. Тектоническая реконструкция для апта-альба, (145–125 Ма). Кинематическая реконструкция для 115 Ма. Условные обозначения как и на предыдущем рисунке. 1 – суша кратонов, 2 – шельфовый бассейн, 3 – приподнятая активная суша, 4 – шельфовый бассейн с проградацией клиноформ, 5 – от аллювиальной равнины до мелкого моря, 6 – от мелкого моря до аллювиальной равнины, 7 – океанический/глубоководный бассейн, 8 – базальты (траппы), 9 – посторогенные вулканиты, 10 – окраинно-континентальный вулканический пояс, 11 – область континентального рифтинга и крупномасштабного магматизма, 12 – аккреционный ороген. По (Nikishin et al., 2021с, с изменениями).

#### 11.12. Поздний мел, сеноман-кампан

Детально реконструкция этапа описана в (Nikishin et al., 2021c). Для позднего мела характерна относительно спокойная тектоническая обстановка. В бассейнах Восточной Арктики преобладало термальное пострифтовое погружение. В области Западной Арктики и Западной Сибири доминировали шельфовые морские обстановки. Вулканизм происходил в пределах поднятия Альфа-Менделеева и на шельфах морей США и Канады. На границе Азии и Тихого океана формировался Охотско-Чукотский вулканический пояс. Он стал, вероятно, главным водоразделом в Азии. Речные системы текли с этого пояса в шельфовые моря Южной Кары и Западной Арктики (рис. 121, 122).



Рис. 120. А. Фрагмент сейсмического профиля для района Баренцева моря. В. Интерпретация этого сейсмического профиля с выделением возможных лав и интрузий. Корреляция сейсмических данных с данными бурения показывает, что уровень лав близок к границе баррема и апта. С. Модель формирования интрузии и «принудительного» складкообразования в вышележащей толще осадочного чехла (Mathieu et al., 2008). D. Локация сейсмического профиля (звезда). Е. Фрагмент этого профиля. По (Nikishin et al., 2921b,с изменениями).

Для позднего мела ключевым вопросом является реконструкция речных систем на суше. Необходимо понять источники и направления сноса обломочного материала. Наличие детритовых цирконов мезозойского возраста (включая мел) в песчаниках разрезов Южно-Карского бассейна и Новосибирских островов, указывает на вероятность того, что многие крупные речные системы, которые поставляли обломочный материал в шельфовые моря Арктики, брали начало в области мезозоид Дальнего Востока (рис. 121).



Рис. 121. Палеогеографическая карта для позднего мела, сеномана-кампана (100-80 Ма) на современной географической основе. Географическая основа – геологическая карта Арктики (Harrison et al., 2011). По (Nikishin et al., 2021с, с изменениями). Цифры в белых прямоугольниках – пики возрастов детритовых цирконов (наши и литературные данные).



Рис. 122. Тектоническая реконструкция для позднего мела, сеномана-кампана (100–80 Ма). Кинематическая реконструкция для 88 Ма. Условные обозначеник как и на предыдущем рисунке. Цифры в кружках: 1 — суша кратонов, 2 – шельфовые бассейны, 3 – приподнятая и тектонически активная суша, 4 – аллювиальные равнины и мелководное море, 5 – глубокий шельф, 6 – океанические бассейны, 7 – базальты, 8 – окраинно-континентальный вулканический пояс, 9 – область внутриплитного магматизма Альфа-Менделеева. По (Nikishin et al., 2021с, с изменениями).

#### 11.13. Палеоцен

Детально реконструкция этапа описана в (Nikishin et al., 2021c). Примерно на рубеже мела и палеоцена на краю Азии произошла значительная по масштабам орогения. Здесь формировался аккреционный и коллизионный ороген в полосе от Охотского моря до Корякии и Аляски. Примерно синхронно проявилась юриканская коллизионная орогения (от названия поселка Юрика (Eureka) на Канадском архипелаге) в районах Арктического архипелага Канады, северного края Гренландии и на Шпицбергене. Эта орогения привела к росту гор на окраине Азии. Усиление процессов эрозии горных сооружений привело к быстрому заполнению клиноформными комплексами ранее существовавшего глубоководного Северо-Чукотского бассейна.

В палеоцене произошла новая фаза рифтинга в области моря Лаптевых и между современным краем шельфа Баренцево-Карского моря и хребтом Ломоносова.

В бассейнах Западной Арктики преобладали шельфовые морские обстановки с возможной кремнистой седиментацией и постоянными регрессиями.

В Азии развивались обширные речные системы, часть из которых начиналась на окраинно-континентальном орогене и транспортировала обломочный материал в бассейны Восточной Арктики (рис. 123, 124).



Рис. 123. Палеогеографическая карта для палеоцена (66–56 Ма) на современной географической основе. По (Nikishin et al., 2021с, с изменениями).

Для палеоценового этапа необходимо уточнение вопросов стратиграфии, а также достижения однозначного понимания сейсмостратиграфии.



Рис. 124. Тектоническая реконструкция для палеоцена (66–56 Ма). Кинематическая реконструкция для 65 Ма. Условные обозначения как и на предыдущем рисунке. Цифры в кружках: 1 – суша кратонов, 2 – шельфовые бассейны, 3 – приподнятая и тектонически активная суша, 4 – шельф с проградацией клиноформ. 5 – глубокий шельф и континентальный склон, 6 – аллювиальные равнины и мелководное море, 7 – глубокой шельф, 8 – океанический бассейн, 9 – аккреционно-коллизионный ороген, 10 – окраинно-континентальный вулканический пояс, 11 – ось спрединга. По (Nikishin et al., 2021с, с изменениями).

#### 11.14. Ранний-средний эоцен

Детально реконструкция этапа описана в (Nikishin et al., 2021c). Примерно на рубеже палеоцена и эоцена произошло крупное магматическое событие: в Северной Атлантике проявился крупномасштабный вулканизм, который предшествовал раскрытию Северной Атлантики в эоцене. На севере моря Лаптевых мы также выделили районы проявления этого магматизма, который предшествовал раскрытию Евразийского бассейна.

В Восточной Арктике рифтинг происходил в районе моря Лаптевых. В целом, бассейны Восточной Арктики в раннем-среднем эоцене испытывали термальное погружение. Основной горный пояс формировался между Азией и Тихим океаном. С него брали начало речные системы, которые транспортировали обломочный материал в бассейны Восточной Арктики. В эоцене продолжилось развитие Юриканского орогена, на Шпицбергене формировался краевой прогиб. В бассейнах Западной Арктики и в Западной

Сибири преобладали морские шельфовые обстановки с регулярными регрессиями моря. Здесь также была характерна кремнистая седиментация (рис. 125, 126).



Рис. 125. Палеогеографическая карта для раннего-среднего эоцена (56–45 Ма) на современной географической основе. По (Nikishin et al., 2021с, с изменениями).



Рис. 126. Тектоническая реконструкция для раннего-среднего эоцена (56–45 Ма). Кинематическая реконструкция для 56 Ма. Условные обозначения как и на предыдущем рисунке. Цифры в кружках: 1 – суша кратонов, 2 – шельфовые бассейны, 3 – приподнятая и тектонически активная суша, 4 – аллювиальные равнины и мелководное море. 5 – глубокий шельф и континентальный склон, 6 – океанический бассейн , 7 – аккреционно-коллизионный ороген, 8 – плюмовые базальты, 9 – окраинно-континентальный вулканический пояс, 10 – ось спрединга. По (Nikishin et al., 2021с, с изменениями).

Для раннего-среднего эоцена ключевым вопросом является понимание типа континентальной окраины моря Лаптевых. Вполне возможно, там развивалась вулканическая континентальная окраина.

#### 11.15. Средний-поздний эоцен

Детально реконструкция этапа описана в (Nikishin et al., 2021с). Примерно 45 млн. лет назад произошла существенная перестройка тектонического и палеогеографического планов (рис. 127, 128). На севере Западной Сибири начало формироваться поднятие, которое отделило акваторию Арктического океана от океана Тетис. Вероятно, весь район Баренцева-Карского морей был осушен и в его пределах формировались многочисленные пологие антиклинали (рис. 129). Юриканская орогения достигла максимума. Срединноокеанический хребет Гаккеля перешел в режим ультрамедленного спрединга. В пределах Восточной Арктики и Дальнего Востока проявилась фаза регионального рифтинга. Рифтовые системы формировались в регионе от Анадырского и Наваринского бассейнов в Беринговом море до Южно-Чукотского бассейна в Чукотском море.



Рис. 127. Палеогеографическая карта для среднего-позднего эоцена (45–34 Ма) на современной географической основе. По (Nikishin et al., 2021с, с изменениями).

Процессы сдвиго-растяжения охватили огромную область Чукотского и Восточно-Сибирского морей. Вертикальные тектонические движения и сбросообразование проявились в области хребта Ломоносова и на поднятии Альфа-Менделеева. В районе Чукотского моря и Аляски также происходили вертикальные движения. Все это обусловило масштабную клиноформную седиментация в Северо-Чукотском бассейне и в других сопряженных бассейнах (рис. 130).



Рис. 128. Тектоническая реконструкция для среднего-позднего эоцена (45–34 Ма). Кинематическая реконструкция для 45 Ма. Условные обозначения как и на предыдущем рисунке. Цифры в кружках: 1 – суша кратонов, 2 – шельфовые бассейны, 3 – приподнятая и тектонически активная суша, 4 – проградационный шельф с клиноформами, 5 – область пологого воздымания, 6 – аллювиальные равнины и мелководное море. 7 – глубокий шельф и континентальный склон, 8 – океанический бассейн , 9 – окраинно-континентальный вулканический пояс, 9 – окраинно-континентальный вулканический пояс, 9 – окраинно-континентальный вулканический пояс, с вертикальными движениями и сбросообразованием. По (Nikishin et al., 2021с, с изменениями).



Рис. 129. Интерпретация регионального сейсмического профиля 4–AR для Восточно-Баренцевского мегабассейна. Модифицировано по (Старцева и др., 2017; Nikishin et al., 2021с). Антиклинальные структуры сформировались в послемеловое время, вероятно 45–34 Ма. На профиле у границы апта и альба выделяется вулканический горизонт. Вероятно, это лавы одновозрастные лавам Земли Франца Иосифа.

В среднем-позднем эоцене произошла перестройка речных систем. Дельтовая седиментация стала типичной для бассейнов Восточной Арктики и, в частности, для Западно-Лаптевского бассейна.

Крупная перестройка в палеогеографии привела к климатически изменениям и началу похолодания. Примерно начиная с 45 млн. лет назад в Арктике прекратилась кремнистая седиментация и стали образовываться глины и обломочные породы.

Для среднего-позднего эоцена критическим является понимание времени формирования антиклинальных структур во многих бассейнах Арктики и в Западной Сибири.



Рис. 130. Тектоническая реконструкция для среднего-позднего эоцена (45–34 Ма). Также показаны основные геодинамические обстановки. По (Nikishin et al., 2021с, с изменениями).

# 12. Хроностратиграфия некоторых осадочных бассейнов Арктического региона

Для глубоководной части Арктического океана и некоторых осадочных бассейнов арктических шельфов России мы составили схемы хроностратиграфии, которые дополняют наши палеогеографические построения (рис. 131–136).





#### Хроностратиграфия некоторых осадочных бассейнов Арктического региона



Рис.132. Хроностратиграфия Северо-Карского бассейна (показана на фрагменте сейсмического профиля PGS 12–013). Составили К.Ф. Старцева, В.А. Никишин и А.М. Никишин. Новые данные по стратиграфическому бурению на севере Карского моря показывают (Малышев и др., 2022), что отложения, обозначенные нами как нижний-средний ордовик, имеют вероятный позднекембрийский возраст. Проблемы стратиграфии Северо-Карского бассейна продолжают быть дискуссионными.



Рис. 133. Хроностратиграфия Восточно-Баренцевского мегабассейна. Составили К.Ф. Старцева и А.М. Никишин.

# Тектоностратиграфия и углеводородные системы Южно-Карского бассейна



Рис. 134. Тектоностратиграфия и углеводородные системы Южно-Карского бассейна.

### Хроностратиграфия некоторых осадочных бассейнов Арктического региона



Рис. 135. Хроностратиграфия бассейнов Арктики. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).



Рис. 136. Хроностратиграфия для района Северо-Чукотского бассейна и бассейна Подводников. По (Nikishin et al., 2021b, с изменениями).

## 13. Геодинамическая история района поднятия Альфа-Менделеева

Тектоническая и геодинамическая история района поднятия Альфа-Менделеева была нами рассмотрена в специальной работе (Nikishin et al., 2022). Здесь мы сформулируем основные выводы. На рис 137 показаны наклоны комплексов SDRs по сейсмическим профилям 2D. На рис. 138 показаны гипотетические наклоны комплексов SDRs исходя из данных по другим регионам мира (SDRs обычно наклонены в сторону более глубоководной части моря). Мы видим примечательную картину. Комплексы SDRs наклонены в сторону сопряженных глубоководных бассейнов и, соответственно, в бассейнах наклоны SDRs направлены в сторону их осевых частей. Считается, что комплексы SDRs развиты только на утоненной в разной степени континентальной коре (хотя, дискуссии на эту тему продолжаются). На рис. 139 показана мощность синрифтовых отложений (SRDs), толщина которых составляет 2 сек (TWT).

На рис. 140, 141 показаны наши модели строения коры поднятия Менделеева, подтверждающие концепцию наличия здесь растянутой в разной степени континентальной коры.

На рис. 142 по результатам нашей интерпретации профилей выделены сейсмофации апт-альбского возраста. Мы различаем континентальные рифты, трапповые плато (платобазальты), поднятие Альфа-Менделеева с комплексами SDRs, относительно глубоководные бассейны с таким же комплексами SDRs, оси растяжения континентальной коры. Район поднятия Альфа-Менделеева вместе с сопряженными бассейнами (район распространения SDRs) почти полностью соответствует области с очень яркими магнитными аномалиями (Alpha-Mendeleev LIP magnetic domain (магнитный домен Большой Магматической Провинции Альфа-Менделеева).

На рис. 143 показан разрез коры поднятия Альфа-Менделеева. Верхняя часть разреза показана по результатам интерпретация реального сейсмического профиля, а нижняя основана на данных нашего моделирования строения коры. На разрезе видна симметрия в наклонах комплексов SDRs. Все они наклонены в направлении оси глубоководного бассейна.

На рис. 144 показана наша обновленная версия палеотектонической обстановки для эпохи формирования поднятия Альфа-Менделеева, а на рис. 145 – итоговая геодинамическая модель его формирования.

129

Геодинамическая история района поднятия Альфа-Менделеева



Рис. 137.Ориентация наклонов рефлекторов в полуграбенах вдоль 2Д сейсмических линий. Длина стрелки равна длине рефлектора. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 138. Предполагаемая ориентация наклонов рефлекторов в полуграбенах (стрелки). Показаны оси основных тектонических структур. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).

Геодинамическая история района поднятия Альфа-Менделеева



Рис. 139. Карта толщин синрифтового комплекса. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).

Многие вопросы геодинамики Арктического региона по-прежнему являются дискуссионными. Здесь мы не будем их обсуждать, также как и все ранее предложенные многими исследователями модели геодинамической эволюции Арктики. Это является предметом отдельной работы.



Рис. 140. Двумерная грави-магнитная Модель 1. Наблюдаемая магнитная аномалия (сплошная голубая линия) взята из грида и сравнена с расчетными данными (пунктирная голубая линия). Наблюдаемые гравитационные аномалии в свободном воздухе (сплошная красная линия) взяты из грида и сравнены с расчетными данными (пунктирная красная линия). Положение профиля показано на рис. 1. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 141. Двумерная грави-магнитная Модель 2. Наблюдаемая магнитная аномалия (сплошная голубая линия) взята из грида и сравнена с расчетными данными (пунктирная голубая линия). Наблюдаемые гравитационные аномалии в свободном воздухе (сплошная красная линия) взяты из грида и сравнены с расчетными данными (пунктирная красная линия). По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 142. Карта основных апт-альбских структур на современной географической основе. Очертания Альфа-Менделеев LIP по (Saltus et al., 2011). По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).



Рис. 143. Концептуальная модель строения коры поднятия Менделеева и сопряженных областей. А. Интерпретация сейсмического профиля (рис. 32) для верхней коры. В. Модель строения нижней коры с учетом наших моделей (см. рис. 140, 141). По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).

Геодинамическая история района поднятия Альфа-Менделеева



Рис. 144. Палеотектоническая реконструкция для апта-альба. Возраста базальтов по (Morozov et al., 2013; Mukasa et al., 2020; Dockman et al., 2018; Corfu et al., 2013; Nikishin et al., 2021 b,c; Polteau et al., 2016; Skolotnev et al., in preparation). По (Nikishin et al., 2021c, 2022, с изменениями).

#### Геодинамическая история района поднятия Альфа-Менделеева





Рис. 145. Схематическая геодинамическая модель для поднятия Менделеева и сопряженных глубоководных бассейнов для апта-альба. Модели в (Nikishin et al., 2014; Geoffroy et al., 2015, 2020; Foulger et al., 2020) были использованы с изменениями. По (Nikishin et al., 2022, с изменениями).

# Заключение

В данной работе мы попытались осуществить современный синтез максимально возможного объема исходных геофизических и геологических данных для создания модели геологического строения и эволюции Арктического океана.

Во введении мы привели список коллег, с которыми мы вели научные дискуссии, за что им всем благодарны. Наше общение с ними всегда было плодотворным и конструктивным. При интерпретации сейсмических данных постоянно велись дискуссии с сотрудниками ПАО НК "Роснефть": А.Б. Поповой, Е.А. Булгаковой, И.В. Мазаевой, С.А. Зайцевой, С.М. Данилкиным, О.С. Маховой, В.В. Обметко, М.В. Скарятиным, А.А. Бородулиным, В.Н. Ставицкой, Д.В. Игтисамовым, А.С. Федечкиной, Н.А. Васильевой, А.А. Валющевой, Ю.В. Масленниковой, Д.Н. Мясоедовым, И.С. Васильевой и многими другими. Им мы также выражаем огромную благодарность.

Авторы благодарны рецензентам Г.Л. Лейченкову и С.Ю. Соколову, их комментарии способствовали улучшению нашей работы. Мы признательны М.А. Рогову (ГИН РАН) и Т.Ю. Тверитиновой (МГУ) за содействие в оформлении нашей работы.

Исследования сотрудников МГУ были поддержаны несколькими грантами РФФИ и РНФ, а в настоящее время – грантом РНФ № 22–27–00160.

Все рисунки работы с высоким разрешением можно взять на: https://disk.yandex.ru/d/jLdu13oB-M8LIg

136

- Артюшков Е.В., Смирнов О.Е., Чехович П.А. 2021. Континентальная кора в западной части Амеразийского бассейна: Механизмы погружения. Геология и геофизика, т. 62, № 7, 885–901. DOI: 10.15372/GiG2020129.
- Богданов Н.А. 2004. Тектоника Арктического океана. Геотектоника. № 3. с. 13–30.
- Бяков А.С. 2010. Зональная стратиграфия, событийная корреляция, палеогеография перми Северо-Востока Азии (по двустворчатым моллюскам). Сев.-Вост. комплекс. НИИ ДВО РАН. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2010. 262 с.
- Вержбицкий В.Е., Соколов С.Д., Тучкова М.И. 2015. Современная структура и этапы тектонической эволюции острова Врангеля (Российская Восточная Арктика). Геотектоника. №3, с. 3–35.
- Верниковский В.А., Морозов А.Ф., Петров О.В., Травин А.В., Кашубин С.Н., Шокальский С.П., Шевченко С.С., Петров Е.О. 2014. Новые данные о возрасте долеритов и базальтов поднятия Менделеева: к проблеме континентальной коры в Северном Ледовитом океане. Доклады РАН, т. 454, № 4, с. 431—435.
- Глебовский В.Ю., Каминский В.Д., Минаков А.Н., Меркурьев С.А., Чайлдерс В.А., Брозена Дж.М. 2006. Формирование бассейна Евразии в Северном Ледовитом океане по данным геоисторических исследований. Анализ аномального магнитного поля. Геотектоника, т. 40, № 4, с. 263—281.
- Голионко Б.Г., Ватрушкина Е.В., Вержбицкий В.Е., Соколов С.Д., Тучкова М.И. 2018. Деформации и этапы структурной эволюции мезозойских комплексов Западной Чукотки. Геотектоника. № 1. С. 63–78.
- Голованов Д.Ю., Богоявленская О.В., Никишин В.А., Малышев Н.А., Вержбицкий В.Е., Комиссаров Д.К. 2022. Анализ кайнозойской эрозии осадочных отложений Восточно-Баренцевского мегабассейна с учетом трехмерного моделирования углеводородных систем. Арктика. Экология и экономика. Том 12, № 3, с. 320–333.
- Гриненко О.В., Гладенков Ю.Б., Буданцев Л.Ю. и др. 1989. Палеоген и неоген Северо-Востока СССР. Якутск. Якут. науч. центр СО АН СССР, 1989, 181 с.
- Ихсанов Б. И. 2014. Позднемезозойские и кайнозойские деформации осадочных бассейнов акватории Чукотского моря. Диссертация ... кандидата геолого-минералогических наук. Москва. 116 с.

- Катков С.М., Стриклэнд А., Миллер Э.Л., Торо Дж. 2007. О возрасте гранитных интрузий Анюйско-Чукотской складчатой системы. Доклады РАН. Т. 414. № 2. С. 219–222.
- Косько М.К., Авдюничев В.В., Ганелин В.Г., Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Сесил М.П., Ушаков В.И., Хандожко Н.В., Харрисон Дж.К., Шульга Ю.Д. 2003.Остров Врангеля: геологическое строение, минерагения, геоэкология. Министерство природных ресурсов РФ, Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана. СПб., ВНИИОкеангеология, 137 с.
- Кузьмичев А.Б., Александрова Г.Н., Герман А.Б., Данукалова М.К., Симакова А.Н. 2013. Палеоген-неогеновые отложения острова Бельковский (Новосибирские острова): к характеристике осадочного чехла в восточной части шельфа моря Лаптевых. Стратиграфия. Геологическая корреляция. Том 21, № 4, 91–116. DOI: 10.7868/S0869592X13040054.
- Курапов М.Ю. 2022. Палеозойско-раннемезозойский гранитоидный магматизм Карского блока (п-ов Таймыр и арх. Северная Земля) (Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук). Санкт-Петербургский государственный университет. 382 с.
- Лаверов Н.П., Лобковский Л.И, Кононов М.В., Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Соколов С.Д., Шипилов Э.В. Геодинамическая модель тектонического развития Арктики в мезозое и кайнозое и проблема внешней границы континентального шельфа Россиию. Геотектоника. 2013. №1. С. 3–35.
- Лобковский Л.И., Вержбицкий В.Е., Гарагаш И.А., Кононов М.В., Соколов С.Д., Котелкин В.Д., Тучкова М.И., Верниковский В.А., Шрейдер А.А. 2011. Геодинамическая модель эволюции Арктического региона в позднем мезозое кайнозое и проблема внешней границы континентального шельфа Россиию. Арктика. Экология и экономика. №1. с.104–125.
- Лобковский Л.И., Соколов С.Д., Сорохтин Н.О., Кононов М.В. 2021а. Двухъярусная субдукция в верхней мантии как механизм эволюции литосферы Восточной Арктики в поздней юре раннем мелу. Доклады РАН, 500(2), 123–130. DOI: <u>10.31857/S2686739721100108</u>
- Лобковский Л.И., Шипилов Э.В., Сорохтин Н.О. 2021б. Образование основных тектонических структур и магматических провинций Арктики в позднем мелу-

кайнозое с позиций субдукционно-конвективной модели ее эволюции. Доклады РАН, 501(1), 5–10. DOI: 10.31857/S2686739721110074

- Лучицкая М.В., Соколов С.Д., Вержбицкий В.Е., Ватрушкина Е.В., Ганелин А.В., Голионко Б.Г. 2019. Постколлизионные гранитоиды и апт-альбское растяжение в тектонической эволюции чукотских мезозоид, северо-восток России. Докл. РАН, Т. 484. № 3. С. 329–334.
- Малышев Н.А., Вержбицкий В. Е., Скарятин М. В., Балагуров М. Д., Илюшин Д. В., Колюбакин А. А., Губарева О. А., Гатовский Ю. А., Лакеев В. Г., Лукашев Р. В., Ступакова А. В., Суслова А. А., Обметко В. В., Комиссаров Д. К. 2022. Стратиграфическое бурение на севере Карского моря: первый опыт реализации Проекта и предварительные результаты. Геология и геофизика (в печати)
- Малышев Н.А., Никишин В.А., Никишин А.М., Обметко В.В., Мартиросян В.Н., Клещина Л.Н., Рейдик Ю.В. 2012. Новая модель геологического строения и истории формирования Северо-Карского осадочного бассейна. Доклады РАН. Т. 445. № 1. с. 50–54.
- Малышев Н.А., Обметко В.В., Бородулин А.А. 2010. Оценка перспектив нефтегазоносности осадочных бассейнов Восточной Арктики. Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». № 1. с. 20–28.
- Метелкин Д.В., Абашев В.В., Верниковский В.А., Михальцов Н.Э. 2022. Палеомагнетизм архипелага Земля Франца-Иосифа: приложение к мезозойской тектонике Баренцевоморской континентальной окраины. Геология и геофизика, том 63, № 4, с.410–439.
- Моисеев А.В., Соколов С.Д., Тучкова М.И., Вержбицкий В.Е., Малышев Н.А. 2018а. Этапы структурных деформаций и трековое датирование апатита неопротерозойтриасовых комплексов о. Врангеля. Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Материалы L Тектонического совещания. Т.2. С. 23–27.
- Моисеев А.В., Соколов С.Д., Тучкова М.И., Вержбицкий В.Е., Малышев Н.А. 20186. Этапы структурной эволюции осадочного чехла о. Врангеля, Восточная Арктика. Геотектоника. № 5. С. 22–38.
- Морозов А.Ф., Петров О.В., Шокальский С.П., Кашубин С.Н., Кременецкий А.А., Шкатов М.Ю., Каминский В.Д., Гусев Е.А., Грикуров Г.Э., Рекант П.В., Шевченко С.С., Сергеев С.А., Шатов В.В. 2013. Новые геологические данные, обосновывающие

континентальную природу области Центрально-Арктических поднятий. Региональная геология и металлогения. № 53. С. 34–55.

- Никишин А.М., Малышев Н.А., Петров Е.И. 2020. Основные проблемы строения и геологического развития Арктического океана. Вестник Российской Академии Наук, том 90, № 5, 434–446.
- 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. 2019. Сейсмостратиграфия и этапы геологической истории осадочных бассейнов Восточно-Сибирского и Чукотского морей и сопряженной части Амеразийского бассейна. Геотектоника, № 6, 3–26. DOI: https://doi.org/10.31857/S0016-853X201963–26
- Никишин В.А. 2013. Внутриплитные и окраинноплитные деформации осадочных бассейнов Карского моря (Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук). МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет. 135 с.
- Петровская Н.А., Савишкина М.А. 2014. Сопоставлениесейсмокомплексов и основных несогласий в осадочном чехле шельфа Восточной Арктики. Нефтегазовая геология. Теория и практика. Т. 9, № 3. DOI: https://doi.org/10.1144/M57-2019-14
- Пискарев А.Л., Поселов В.А., Аветисов Г.П., Буценко В.В., Глебовский В.Ю., Гусев Е.А., Жолондз С.М., Каминский В.Д., Киреев А.А., Смирнов О.Е., Фирсов Ю.Г., Зинченко А.Г., Павленкин А.Д., Поселова Л.Г., Савин В.А., Черных А.А., Элькина Д.В. 2016. Арктический бассейн (геология и морфология). СП.: ВНИИОкеангеология, 291 с.
- Попова А.Б., Махова О.С., Малышев Н.А., Вержбицкий В.Е., Обметко В.В., Бородулин А.А. 2018. Построение комплексной сейсмогеологической модели шельфа Восточно-Сибирского моря. Нефтяное хозяйство, 4. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-4-30-34
- Пущаровский Ю.М. 1960. Некоторые общие проблемы тектоники Арктики. Известия Академии Наук СССР, Серия геологическая. №9, 15–28.
- Пущаровский Ю.М. 1976. Тектоника Северного Ледовитого Океана. Геотектоника, № 2, 3–14.
- Родина Е.А., Никишин А.М., Старцева К.Ф., Посаментьер Г.У. 2022. Формы проявления мелового вулканизма и интрузивного магматизма в районе поднятия Менделеева

(Арктический океан) по данным сейсморазведки. Вестник МГУ. Сер. 4. Геология, №4, 3–20.

Савин В.А. 2020. Строение земной коры осадочных бассейнов морей Лаптевых и Восточно-Сибирского по данным геофизического моделирования. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геол.-мин. наук. ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга.

http://dissovet.sbras.ru/SBdisdocs/savin2019/Диссертация Савин%20В.А.pdf

- Скарятин М.В., Баталова А.А., Воргачева Е.Ю., Булгакова Е.А., Зайцева С.А., Игтисамов Д.В., Моисеева Р.Х., Вержбицкий В.Е., Малышев Н.А., Обметко В.В., Бородулин А.А. 2020. Соляная тектоника и перспективы нефтегазоносности российского сектора Чукотского моря. Нефтяное хозяйство, 02, 12–17. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-2-12-17
- Скарятин М.В., Ставицкая В.Н., Мазаева И.В., Зайцева С.А., Баталова А.А., Моисеева Р.Х., Винниковская Е.В., Булгакова Е.А., Малышев Н.А., Вержбицкий В.Е., Обметко В.В., Бородулин А.А. 2020. Построениеп стратиграфического каркаса осадочного чехла Северо-Чукотского мегапрогиба на основе анализа траектории смещения кромки клиноформ в пространстве. Нефтяное хозяйство, 11, 20–26. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-11-20-26
- Сколотнев С.Г., Фрейман С.И., Хисамутдинова А.И., Ермолаев Б.В., Окина О.И., Сколотнева Т.С. 2022. Осадочные породы фундамента поднятия Альфа-Менделеева в Северном Ледовитом океане. Литология и полезные ископаемые. № 2. С. 136–160. https://doi.org/10.31857/S0024497X22020082
- Сколотнев С.Г., Федонкин М.А., Корнийчук А.В. 2017. Новые данные о геологическом строении юго-западной части поднятия Менделеева (Северный Ледовитый океан). Доклады РАН. Т. 476, № 2. С. 190–196.
- Соколов С.Д., Лобковский Л.И., Верниковский В.А., Тучкова М.И., Сорохтин Н.О., Кононов М.В. 2022. Тектоника и геодинамика Восточной Арктики в мезозое. Геология и геофизика, т. 63, № 4, 3890409. DOI: 10.15372/GiG2021188
- Соколов С.Д., Тучкова М.И., Моисеев А.В., Вержбицкий В.Е., Малышев Н.А., Гущина М.Ю. 2017. Тектоническая зональность острова Врангеля (Арктика). Геотектоника. № 1. С. 3–18.

- Соловьев А.В., Зайончек А.В., Супруненко О.И., Брекке Х., Фалеиде Дж.И., Рожкова Д.В., Хисамутдинова А.И., Столбов Н.М., Хоуриган Дж.К. 2015. Эволюция источников сноса триасовых отложений архипелага Земля Франца-Иосифа: U/PB LA-ICP-MS датирование обломочного циркона из скважины Северная. Литология и полезные ископаемые, № 2, с. 113–128
- Ставицкая В.Н., Махова О.С., Малышев Н.А., Вержбицкий В.Е., Мазаева И.В., Скарятин М.В., Булгакова Е.А., Зайцева С.А. 2020. Перспективы нефтегазоносности мезозойско-кайнозойских отложений Восточно-Сибирского и Чукотского морей по результатам секвенс-стратиграфического анализа. Нефтяное хозяйство, 4; DOI: 10.24887/0028-2448-2020-4-17-23
- Старцева К.Ф, Никишин А.М., 2022. Апт-альбские и эоценовые сдвиговые деформации Восточно-Сибирского и Северо-Чукотского бассейнов. Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы–2022. Материалы LIII Тектонического совещания. Т. 2. с. 203–205, М.: ГЕОС, 2022
- Ульянов Д.К., Моисеев А.В., Соколов С.Д., Тучкова М.И., Вержбицкий В.Е., Малышев Н.А. 2021. Датирование тектонических событий путем восстановления термальной истории на примере острова Врангеля (Восточная Арктика). В сборнике: Новые идеи в науках о Земле. Материалы XV Международной научно-практической конференции. В 7-ми томах. Москва, С. 88–92.
- Фрейман С.И., Никишин А.М., Петров Е.И. 2019. Кайнозойские клиноформные комплексы и геологическая история Северо-Чукотского бассейна. Вестник Московского ун-та. Сер. 4. Геология, № 4, 11–19.
- Хаин В.Е. 1985. Региональная геотектоника. Океаны. Синтез. М.: Недра, 292 с.
- Черных А.А., Крылов А.А. 2011. Седиментогенез в котловине Амундсена в свете геофизических данных и материалов бурения на хребте Ломоносова. Доклады РАН. Т. 440. № 4. С. 516–520.
- Akinin, V., Gottieb, E.S., Miller, E.L., Poszunenkov, G.O., Stolbov, N.M., Sobolev, N.N., 2015. Age and composition of basement beneath the De Long archipelago, Arctic Russia, based on zircon U–Pb geochronology and O–Hf isotopic systematics from crustal xenoliths in basalts of Zhokhov Island. Arktos. DOI 10.1007/s41063-015-0016-6

- Alvey, A., Gaina, C., Kushner, N.J., Torsvik, T.H., 2008. Integrated crustal thickness mapping and plate reconstructions for the high Arctic. Earth and Planetary Science Letters. 274, 310–321.
- Backman, J., Jakobsson, M., Frank, M., Sangiorgi, F., Brinkhuis, H., Stickley, C., O'Regan, M., Løvlie, R., Pälike, H., Spofforth, D., Gattacecca, J., Moran, K., King, J., Heil, C., 2008.
  Age model and core-seismic integration for the Cenozoic Arctic Coring Expedition sediments from the Lomonosov Ridge. Paleoceanography 23, n/a-n/a. <a href="https://doi.org/10.1029/2007PA001476">https://doi.org/10.1029/2007PA001476</a>
- Bird, K.J., Houseknecht, D.W., and Pitman, J.K., 2017, Geology and assessment of undiscovered oil and gas resources of the Hope Basin Province, 2008, chap. D of Moore, T.E., and Gautier, D.L., eds., The 2008 Circum-Arctic Resource Appraisal: U.S. Geological Survey Professional Paper 1824, 9 p., https://doi.org/10.3133/pp1824D.
- Brumley, K, 2014. Geologic history of the Chukchi Borderland, Arctic Ocean. A dissertation submitted to the department of geology and environmental sciences and the committee on graduate studies of Stanford university in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of philosophy. http://purl.stanford.edu/hz857zk1405
- Brumley, K., Miller, E., Konstantinou, A., Grove, M., Meisling, K.E., Mayer, L.A., 2015. First bedrock samples dredged from submarine outcrops in the Chukchi Borderland, Arctic Ocean. Geosphere. v. 11, no. 1, doi:10.1130/GES01044.1
- Bruvoll, V., Kristoffersen, Y., Coakley, B.J., Hopper, J.R., 2010. Hemipelagic deposits on the Mendeleev and northwestern Alpha submarine Ridges in the Arctic Ocean: acoustic stratigraphy, depositional environment and an inter-ridge correlation calibrated by the ACEX results. Mar. Geophys. Res. 31, 149–171. https://doi.org/10.1007/s11001-010-9094-9
- Bruvoll, V., Kristoffersen, Y., Coakley, B.J., Hopper, J.R., Planke, S., Kandilarov, A., 2012. The nature of the acoustic basement on Mendeleev and northwestern Alpha ridges, Arctic Ocean. Tectonophysics, 514–517, 123–145. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.015
- Chernykh, A., Glebovsky, V., Zykov, M., Korneva, M. 2018. New insights into tectonics and evolution of the Amerasia Basin. J. Geodyn., 119, 167–182. <u>https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.02.010</u>
- Chernykh, A.A., Astafurova, E.G., Glebovsky, V.Yu., Korneva, M.S., Egorova, A,V., Red'ko, A.G. 2016. New Data on Tectonics of Mendeleev Ridge and Adjacent Geological
Structures. Doklady Earth Sciences, 2016, Vol. 470, Part 1, 900–904. DOI: 10.1134/S1028334X16090117

- Chian, D., Jackson, H.R., Hutchinson, D.R., Shimeld, J.W., Oakey, G.N., Lebedeva-Ivanova, N., Li, Q., Saltus, R.W., Mosher, D.C., 2016. Distribution of crustal types in Canada Basin, Arctic Ocean. Tectonophysics, 691, 8–30. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.01.038
- Coakley, B., Brumley, K., Lebedeva-Ivanova, N., Mosher, D., 2016. Exploring the geology of the central Arctic Ocean; understanding the basin features in place and time. J. Geol. Soc. London. 173, 967–987. https://doi.org/10.1144/jgs2016-082
- Corfu, F., Polteau, S., Planke, S., Faleide J.I, Svensen, H., Zayoncheck. A., and Stolbov, N., 2013. U–Pb geochronology of Cretaceous magmatism on Svalbard and Franz Josef Land, Barents Sea Large Igneous Province. Geol. Mag., Cambridge University Press. doi:10.1017/S0016756813000162.
- Craddock, W.H., Houseknecht, D.W., 2016. Cretaceous–Cenozoic burial and exhumation history of the Chukchi shelf, offshore Arctic Alaska. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 100, 63–100. https://doi.org/10.1306/09291515010
- Dobretsov, N.L., Vernikovsky, V.A., Karyakin, Y.V., Korago, E.A., Simonov, V.A., 2013. Mesozoic–Cenozoic volcanism and geodynamic events in the Central and Eastern Arctic. Russ. Geol. Geophys. 54, 874–887. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.07.008
- Dockman, D.M., Pearson, D.G., Heaman, L.M., Gibson, S.A., Sarkar C. 2018. Timing and origin of magmatism in the Sverdrup Basin, Northern Canada—Implications for lithospheric evolution in the High Arctic Large Igneous Province (HALIP). Tectonophysics, 742–743, 50–65. <u>https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.05.010</u>
- Døssing, A., Jackson, H.R., Matzka, J., Einarsson, I., Rasmussen, T.M., Olesen, A.V., Brozena, J.M., 2013. On the origin of the Amerasia Basin and the High Arctic Large Igneous Province—Results of new aeromagnetic data. Earth Planet. Sci. Lett. 363, 219–230. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.12.013
- Dove, D., Coakley, B., Hopper, J., Kristoffersen, Y., Team, H.G., 2010. Bathymetry, controlled source seismic and gravity observations of the Mendeleev ridge; implications for ridge structure, origin, and regional tectonics. Geophys. J. Int. 183, 481–502. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04746.x
- Drachev, S., Malyshev, N., Nikishin, A. 2010. Tectonic history and petroleum geology of the Russian Arctic Shelves: an overview. In: Vining, B. A. & Pickering S. C. (eds) Petroleum

Geology: From Mature Basins to New Frontiers – Proceedings of the 7th Petroleum Geology Conference. Geological Society, London, 591–619. DOI: 10.1144/0070591.

- Drachev, S.S., Mazur, S., Campbell, S., Green, C., Tishchenko, A., 2018. Crustal architecture of the East Siberian Arctic Shelf and adjacent Arctic Ocean constrained by seismic data and gravity modeling results. J. Geodyn. 119, 123–148.
- Ershova V.B., Prokopiev A.V., Khudoley A.K. 2016. Devonian-Permian sedimentary basins and paleogeography of the Eastern Russian Arctic: an overview. Tectonophysics, 691, 234–255. <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2016.03.026</u>
- Ershova, V., Stockli, D., Khudoley, A., Gaina, C., 2019. When big river started to drain to Arctic Basin: view from the Sverdrup Well (Kara Sea). Geophys. Res. Abstr. EGU2019–9720.EGU Gen. Assem. 2019 21.
- Evangelatos, J., Funck, T., Mosher, D.C., 2017. The sedimentary and crustal velocity structure of Makarov Basin and adjacent Alpha Ridge. Tectonophysics, 696–697, 99–114. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.12.026
- Evangelatos, J., Mosher, D.C. 2016. Seismic stratigraphy, structure and morphology of Makarov Basin and surrounding regions: tectonic implications. Marine Geology. 374, 1–13. http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2016.01.013
- Foulger, G.R., Doré, T., Emeleus, C.H., Franke, D., Geoffroy, L., Gernigon, L., Hey, R., Holdsworth, R.E., Hole, M., Höskuldsson, Á., Julian, B., Kusznir, N., Martinez, F., McCaffrey, K.J.W., Natland, J.H., Peace, A., Petersen, K., Schiffer, C., Stephenson, R., Stoker, M., 2020. A continental Greenland-Iceland-Faroe Ridge. Earth-Science Rev. 102926. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102926
- Franke, D. and K. Hinz ,2005. The structural style of sedimentary basins on the shelves of the Laptev Sea and the western East Siberian Sea, Siberian Arctic., J. Petrol. Geol., 28(3), 269–286.
- Franke, D., 2013. Rifting, lithosphere breakup and volcanism: Comparison of magma-poor and volcanic rifted margins. Mar. Petrol. Geol. 43, 63–87. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.11.003
- Freiman, S., Nikishin, A., Gaina, C., Petrov, E., 2018. Cretaceous plate tectonic model of Russian Arctic shelf. 20th EGU General Assembly, EGU2018, Proceedings from the conference held 4–13 April, 2018 in Vienna, Austria, p. 2200

- Funck, T., Jackson, H.R., Shimeld, J. 2011. The crustal structure of the Alpha Ridge at the transition to the Canadian Polar Margin: Results from a seismic refraction experiment. J. Geophys. Res., 116, B12101, doi:10.1029/2011JB008411
- Funck, T., Shimeld, J., Salisbury, M.H. 2022. Magmatic and rifting-related features of the Lomonosov Ridge, and relationships to the continent-ocean transition zone in the Amundsen Basin, Arctic Ocean. *Geophys. J. Inter.*, 2022;, ggab501, https://doi.org/10.1093/gji/ggab501
- Gaina, C., Medvedev, S., Torsvik, T.H., Koulakov, I., Werner, S.C., 2014. 4D Arctic: A Glimpse into the Structure and Evolution of the Arctic in the Light of New Geophysical Maps, Plate Tectonics and Tomographic Models. Surv. Geophys. 35, 1095–1122. https://doi.org/10.1007/s10712-013-9254-y
- Gaina, C., Nikishin, A.M., Petrov, E.I., 2015. Ultraslow spreading, ridge relocation and compressional events in the East Arctic region – A link to the Eurekan orogeny? Arktos 1, 1-11, doi:doi: 10.1007/s41063-015-0006-8.
- Gaina, C., Werner, S.C., Saltus, R., Maus, S., 2011. Chapter 3 Circum-Arctic mapping project: new magnetic and gravity anomaly maps of the Arctic. Geol. Soc. London, Mem. 35, 39– 48. https://doi.org/10.1144/M35.3
- Galloway, J.M., Tullius, D.N., Evenchick, C.A., Swindles, G.T., Hadlari, T., Embry, A., 2015. Early Cretaceous vegetation and climate change at high latitude: Palynological evidence from Isachsen Formation, Arctic Canada. Cretac. Res. 56, 399–420. https://doi.org/10.1016/j.cretres.2015.04.002
- Geoffroy, L., Burov, E.B., Werner, P. 2015. Volcanic passive margins: another way to break up continents. Sci. Reports. 5:14828. DOI: 10.1038/srep14828
- Geoffroy, L., Gernigon, L. and Foulger, G.R., 2022. Linear magnetic anomalies and the limits of oceanic crust in oceans. In: G.R. Foulger, D.M. Jurdy, C.A. Stein, L.C. Hamilton, K. Howard and S. Stein (Editors), In the Footsteps of Warren B. Hamilton: New Ideas in Earth Science. Geological Society of America, Boulder, CO, Doi: <a href="https://doi.org/10.1130/2021.2553(04">https://doi.org/10.1130/2021.2553(04</a>)
- Glebovsky, V.Y., Astafurova, E.G., Chernykh, A.A., Korneva, M.A., Kaminsky, V.D., Poselov, V.A., 2013. Thickness of the Earth's crust in the deep Arctic Ocean: Results of a 3D gravity modeling. Russ. Geol. Geophys. 54, 247–262. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.02.001

- Gottlieb, E.S., Pease, V., Miller, E.L., Akinin, V., 2018. Neoproterozoic basement history of Wrangel Island and Arctic Chukotka: integrated insights from zircon U–Pb, O and Hf isotopic studies. From: Pease, V. & Coakley, B. (eds) Circum-Arctic Lithosphere Evolution. Geological Society, London, Special Publications, 460, https://doi.org/10.1144/SP460.11
- Grantz, A., Hart, P.E., Childers, V.A., 2011. Geology and tectonic development of the Amerasia and Canada Basins, Arctic Ocean. From: Spencer, A.M., Embry, A.F., Gautier, D.L., Stoupakova, A. V. & Sørensen, K. (eds). Arctic Petroleum Geology. Geological Society, London, Memoirs, 35, 771–799. DOI: 10.1144/M35.50
- Hadlari, T., Midwinter, D., Galloway, J.M., Dewing, K., Durbano, A.M., 2016. Mesozoic rift to post-rift tectonostratigraphy of the Sverdrup Basin, Canadian Arctic. Marine and Petroleum Geology, 76, 148-158. http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.05.008
- Harrison, J.C., Brent, T.A., 2005. Basins and fold belts of Prince Patrick Island and adjacent area, Canadian Arctic Islands. https://doi.org/10.4095/220345
- Harrison, J.C., St-Onge, M.R., Petrov, O.V., Strelnikov, S.I., Lopatin, B.G., Wilson, F.H., Tella, S., Paul, D., Lynds, T., Shokalsky, S.P., Hults, C.K., Bergman, S., Jepsen, H.F., Solli, A., 2011. Geological map of the Arctic; Geological Survey of Canada, Map 2159A, scale 1:5 000 000. Geological Survey of Canada.
- Hegewald, A., Jokat, W., 2013. Tectonic and sedimentary structures in the northern Chukchi region, Arctic Ocean. J. Geophys. Res. Solid Earth 118, 3285–3296.
- Helwig, J., Kumar, N., Emmet P., and Dinkelman, M. G., 2011. Regional seismic interpretation of crustal framework, Canadian Arctic passive margin, Beaufort Sea, with comments on petroleum potential. From: Spencer, A. M., Embry, A. F., Gautier, D. L., Stoupakova, A. V. & Sørensen, K. (eds). Arctic Petroleum Geology. Geological Society, London, Memoirs, 35, 527–543. DOI: 10.1144/M35.35
- Herrle, J.O., Schröder-Adams, C.J., Davis, W., Pugh, A.T., Galloway, J.M., Fath, J., 2015. Mid-Cretaceous High Arctic stratigraphy, climate, and Oceanic Anoxic Events. Geology 43, 403–406. https://doi.org/10.1130/G36439.1
- Hoiland, C.W., Miller E.L., Pease, V., Hourigan, J.K., 2018. Detrital zircon U–Pb geochronology and Hf isotope geochemistry of metasedimentary strata in the southern Brooks Range: constraints on Neoproterozoic–Cretaceous evolution of Arctic Alaska. From: Pease, V. &

Coakley, B. (eds) Circum-Arctic Lithosphere Evolution. Geological Society, London, Special Publications, 460, https://doi.org/10.1144/SP460.16

- Homza, T.X., Bergman, S.C., 2019. A Geologic Interpretation of the Chukchi Sea Petroleum Province: Offshore Alaska, USA. Am. Ass. Petrol. Geologists. https://doi.org/10.1306/AAPG119
- Houseknecht, D.W., 2019a. Evolution of the Arctic Alaska Sedimentary Basin, in: The Sedimentary Basins of the United States and Canada. Elsevier, pp. 719–745. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63895-3.00018-8
- Houseknecht, D.W., 2019b. Petroleum systems framework of significant new oil discoveries in a giant Cretaceous (Aptian–Cenomanian) clinothem in Arctic Alaska. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 103, 619–652. https://doi.org/10.1306/08151817281
- Hutchinson, D.R., Jackson, H.R., Houseknecht, D.W., Li, Q., Shimeld, J.W., Mosher, D.C., Chian, D., Saltus, R.W., Oakey, G.N., 2017. Significance of Northeast-Trending Features in Canada Basin, Arctic Ocean. Geochemistry, Geophys., Geosystems 18, 4156–4178. https://doi.org/10.1002/2017GC007099
- Ilhan I., Coakley B.J., 2018. Meso–Cenozoic evolution of the Chukchi Shelf and North Chukchi Basin, Arctic Ocean. *Marine and Petroleum Geology*, 95, 100–109. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2018.04.014.
- Jackson, H.R., Chian, D. 2019. The Alpha-Mendeleev ridge a large igneous province with continental affinities. GFF, DOI: 10.1080/11035897.2019.1655789
- Jakobsson, M., Backman, J., Rudels, B., Nycander, J., Frank, M., Mayer, L., Jokat, W., Sangiorgi, F., O'Regan, M., Brinkhuis, H., King, J., Moran, K., 2007. The early Miocene onset of a ventilated circulation regime in the Arctic Ocean. Nature 447, 986–990. https://doi.org/10.1038/nature05924
- Jakobsson, M., Mayer, L.A., Bringensparr, C. et al., 2020. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0. Sci Data 7, 176. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0520-9
- Jokat, W., Ickrath, M., 2015. Structure of ridges and basins off East Siberia along 81°N, Arctic Ocean. Marine Petrol. Geol. 64, 222–232. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.02.047
- Jokat, W., Uenzelmann-Neben, G., Kristoffersen, Y., Rasmussen, T.M. 1992. Lomonosov Ridge-A double-sided continental margin. Geology, 20, 887–890.

- Kashubin, S.N., Petrov, O.V., Artemieva, I.M., Morozov, A.F., Vyatkina, D.V., Golysheva, Y.S., Kashubina, T.V., Milshtein, E.D., Rybalka, A.V., Erinchek, Y.M., Sakulina, T.S., Krupnova, N.A., Shulgin, A.A., 2018. 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. 119, 107–122. https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.03.006
- Khudoley A.K., Sobolev N.N., Petrov E.O., Ershova V.B., Makariev A.A., Makarieva E.V., Gaina C. & Sobolev P.O., 2019. A reconnaissance provenance study of Triassic–Jurassic clastic rocks of the Russian Barents Sea, GFF, DOI: 10.1080/11035897.2019.1621372
- Khudoley, A.K., Verzhbitsky, V.E., Zastrozhnov, D.A., O'Sullivan, P., Ershova, V.B., Proskurnin, V.F., Tuchkova, M.I., Rogov, M.A., Kyser, T.K., Malyshev, S.V., Schneider, G.V., 2018. Late Paleozoic – Mesozoic Tectonic Evolution of the Eastern Taimyr-Severnaya Zemlya Fold and Thrust Belt and Adjoining Yenisey-Khatanga Depression. Journal of Geodynamics. <u>https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.02.002</u>
- Knudsen, C., Hopper, J.R., Bierman, P.R., Bjerager, M., Funck, T., Green, P.F., Ineson, J.R., Japsen, P., Marcussen, C., Sherlock, S.C., Thomsen, T.B., 2018. Samples from the Lomonosov Ridge place new constraints on the geological evolution of the Arctic Ocean. From: Pease, V. & Coakley, B. (eds) Circum-Arctic Lithosphere Evolution. Geological Society, London, Special Publications, 460, <u>https://doi.org/10.1144/SP460.17</u>
- Kos'ko M.K., Cecile M.P., Harrison J.C., Ganelin V.G., Khandoshko N.V., and Lopatin B.G., 1993. Geology of Wrangel Island, between Chukchi and Siberian Seas, Northeastern Russia: Geological Survey of Canada Bulletin, 461, 102 p.
- Kos'ko M.K., Trufanov G.V. Middle Cretaceous to Eopleistocene Sequences on the New Siberian Islands: an approach to interpret offshore seismic // Marine Petrol. Geol. 2002. V.19, p.901–919.
- Kossovaya, O.L., Tolmacheva, T.Yu., Petrov, O.V., Isakova, T.N., Ivanova, R.M., Mirolyubova, E.S., Rekant, P.V., Gusev, E.A., 2018. Palaeozoic carbonates and fossils of the Mendeleev Rise (Eastern Arctic): study of sea bottom dredged material. J. Geodyn. 120, 23–44. https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.05.001
- Kuzmichev, A.B., 2009. Where does the South Anyui suture go in the New Siberian islands and Laptev Sea? Implications for the Amerasia basin origin. Tectonophysics 463, 86–108. <u>https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.09.017</u>.

- Langinen, A.E., Lebedeva-Ivanova, N.N., Gee, D.G., Zamansky, Y.Y., 2009. Correlations between the Lomonosov Ridge, Marvin Spur and adjacent basins of the Arctic Ocean based on seismic data. Tectonophysics. 472 (1–4), 309–322, doi:10.1016/j.tecto.2008.05.029.
- Lebedeva-Ivanova, N., Gaina, C., Minakov, A., Kashubin, S., 2019. ArcCRUST: Arctic Crustal Thickness From 3-D Gravity Inversion. Geochemistry, Geophys. Geosystems 2018GC008098. https://doi.org/10.1029/2018GC008098
- Luchitskaya, M.V., Moiseev, A.V., Sokolov, S.D., Tuchkova, M.I., Sergeev, S.A., O'Sullivan, P.B., Verzhbitsky V.E., Malyshev, N.A., 2017. Marginal Continental and Within-Plate Neoproterozoic Granites and Rhyolites of Wrangel Island, Arctic Region. Geotectonics, 2017, Vol. 51, No. 1, pp. 17–39. DOI: 10.1134/S0016852117010034
- Metelkin D.V., Chernova A.I., Matushkin N.Yu., Vernikovsky V.A., 2022. Early paleozoic tectonics and paleogeography of the Eastern Arctic and Siberia: Review of paleomagnetic and geologic data for the De Long Islands. Earth-Science Reviews 231 (2022) 104102; https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104102
- Metelkin, D.V., Vernikovsky, V.A., Kazansky, A.Y., Bogolepova, O.K. Gubanov, A. 2005.
  Palaeozoic history of the Kara microcontinent and its relation to Siberia and Baltica:
  Palaeomagnetism, palaeogeography and tectonics. Tectonophysics, 398, 225–243
- Miller, E., Meisling, K.E., Akinin, V.V., Brumley, K., Coakley, B.J., Gottlieb, E.S., Hoiland, C.W., O'brien, T.M., Soboleva, A., Toro, J. 2018b. Circum-Arctic Lithosphere Evolution (CALE) Transect C: displacement of the Arctic Alaska–Chukotka microplate towards the Pacific during opening of the Amerasia Basin of the Arctic. From: Pease, V. & Coakley, B. (eds) Circum-Arctic Lithosphere Evolution. Geological Society, London, Special Publications, 460, <u>https://doi.org/10.1144/SP460.9</u>
- Miller, E.L., Akinin, V. V., Dumitru, T.A., Gottlieb, E.S., Grove, M., Meisling, K., Seward, G., 2018a. Deformational history and thermochronology of Wrangel Island, East Siberian Shelf and coastal Chukotka, Arctic Russia. Geol. Soc. London, Spec. Publ. 460, 207–238. https://doi.org/10.1144/SP460.7
- Miller, E.L., Verzhbitsky, V.E., 2009. Structural studies near Pevek, Russia: implications for formation of the East Siberian Shelf and Makarov Basin of the Arctic Ocean. Stephan Mueller Spec. Publ. Ser. 4, 223–241. https://doi.org/10.5194/smsps-4-223-2009
- Morozov, A.F., Petrov, O.V., Shokalsky S.P., Kashubin, S.N., Kremenetsky, A.A., Shkatov, M.Yu., Kaminsky, V.D., Gusev, E.A., Grikurov, G.E., Rekant, P.V., Shevchenko, S.S.,

Sergeev, S.A., Shatov, V.V., 2013. New geological data substantiating continental nature of region of Central-Arctic rises. Regional'naya Geologiya i Metallogeniya, 55, 34–55 (in Russian).

- Mosher, D.C., Shimeld, J., Hutchinson, D., Chian, D., Lebedova-Ivanova, N., Jackson, R., 2012. Canada Basin revealed, in: Society of Petroleum Engineers – Arctic Technology Conference 2012. pp. 805–815.
- Mukasa, S.B., Andronikov, A., Brumley, K., Mayer, L.A., and Armstrong, A. 2020. Basalts from the Chukchi Borderland: 40Ar/39Ar Ages and Geochemistry of submarine intraplate lavas dredged from the western Arctic Ocean. American Geophysical Union. doi: 10.1029/2019JB017604
- Nikishin A.M., Rodina E.A., Startseva K.F., Foulger G.R., Posamentier H.W., Afanasenkov A.P., Beziazykov A.V., Chernykh A.A., Malyshev N.A., Petrov E.B., Skolotnev S.G., Verzhbitsky V.E., Yakovenko I.V. 2022. Alpha-Mendeleev Rise, Arctic Ocean: A double volcanic passive margin. Gondwana Research (in press, https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.10.010).
- Nikishin A.M., Rodina E.A., Startseva K.F., Foulger G.R., Posamentier H.W., Afanasenkov A.P., Beziazykov A.V., Chernykh A.A., Malyshev N.A., Petrov E.B., Skolotnev S.G., Verzhbitsky V.E., Yakovenko I.V. 2022. Alpha-Mendeleev Rise, Arctic Ocean: A double volcanic passive margin. Gondwana Research (in press).
- Nikishin, A. M., Malyshev N. A., Petrov E. I., 2014. Geological Structure and History of the Arctic Ocean, EAGE Publications bv, PO Box 59, 3990, DB HOUTEN, the Netherlands, 88 p.
- Nikishin, A.M., Gaina, C., Petrov, E.I., Malyshev, N.A., Freiman, S.I., 2018. Eurasia Basin and Gakkel Ridge, Arctic Ocean: Crustal asymmetry, ultraslow spreading and continental rifting revealed by new seismic data. Tectonophysics, 746, 64–82. http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2017.09.006.
- 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., Rodina, E.A., 2021b. Arctic Ocean Mega Project: Paper 2 – Arctic stratigraphy and regional tectonic structure. Earth-Sci. Rev. 217, 103581. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103581
- 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, 2021c. Arctic Ocean

Mega Project: Paper 3 – Mesozoic to Cenozoic geological evolution. Earth-Sci. Rev. 217. 103034. <u>https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103034</u>

- Nikishin, A.M., Petrov, E.I., Cloetingh, S., Korniychuk, A.V., Morozov, A.F., Petrov, O.V., Poselov, V.A., Beziazykov, A.V., Skolotnev, S.G., Malyshev, N.A., Verzhbitsky, V.E., Posamentier, H.W., Freiman, S.I., Rodina, E.A., Startseva, K.F., Zhukov, N.N., 2021a. Arctic Ocean Mega Project: Paper 1 – Data collection. Earth-Sci. Rev. 217, 103559. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103559.
- Nikishin, A.M., Petrov, E.I., Malyshev, N.A., Ershova, V.P., 2017. Rift systems of the Russian Eastern Arctic shelf and Arctic deep water basins: link between geological history and geodynamics. Geodyn. Tectonophys. 8, 11–43. <u>https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0231</u>
- Nikishin, V.A., 2013. Intraplate and near-plate boundary deformations of the Kara Sea sedimentary basins. PhD thesis. Geological Faculty, Moscow State University, 135 pp.
- Nikishin, V.A., Malyshev, N.A., Nikishin, A.M., Golovanov, D.Yu., Proskurnin, V.F., Soloviev, A.V., Kulemin, R.F., Morgunova, E.S., Ulyanov, G.V., Fokin, P.A., 2017. Recognition of the Cambrian Timan–Severnaya Zemlya Orogen and Timing of Geological Evolution of the North Kara Sedimentary Basin Based on Detrital Zircon Dating. Doklady Earth Sciences, Vol. 473, Part 2, pp. 402–405. DOI: 10.1134/S1028334X17040146
- O'Brein, T.M., Miller, E.L., Benowitz, J.P., Meisling, K.E., Dumitru, T.A., 2016. Dredge samples from the Chukchi Borderland: Implications for paleogeographic reconstruction and Tectonic evolution of the Amerasia basin of the Arctic. American Journal of Science, Vol. 316, November, 2016, P. 873-924, DOI 10.2475/09.2016.03
- Oakey, G.N., Saltus, R.W., 2016. Geophysical analysis of the Alpha–Mendeleev ridge complex: Characterization of the High Arctic Large Igneous Province. Tectonophysics 691, 65–84. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.08.005
- O'Brien, C.L., Robinson, S.A., Pancost, R.D., Sinninghe Damsté, J.S., Schouten, S., Lunt, D.J., Alsenz, H., Bornemann, A., Bottini, C., Brassell, S.C., Farnsworth, A., Forster, A., Huber, B.T., Inglis, G.N., Jenkyns, H.C., Linnert, C., Littler, K., Markwick, P., McAnena, A., Mutterlose, J., Naafs, B.D.A., Püttmann, W., Sluijs, A., van Helmond, N.A.G.M., Vellekoop, J., Wagner, T., Wrobel, N.E., 2017. Cretaceous sea-surface temperature evolution: Constraints from TEX86 and planktonic foraminiferal oxygen isotopes. Earth-Science Reviews, 172, 224–247. http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.012

Ogg, J.G., Ogg, G.M., Gradstein, F.M., 2016. A Concise Geologic TimeScale. Elsevier.

- Pease, V., Drachev, S., Stephenson, R., Zhang, X., 2014. Arctic lithosphere A review. Tectonophysics, 628, 1–25. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.033
- Petrov, O., Morozov, A., Shokalsky, S., Kashubin, S., Artemieva, I.M., Sobolev, N., Petrov, E., Ernst, R.E., Sergeev, S., Smelror, M., 2016. Crustal structure and tectonic model of the Arctic region. Earth-Science Reviews. 154, 29–71. http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.013
- Petrov, O.V., Smelror, M. (eds.). 2021. Tectonics of the Arctic. Springer Geology. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46862-0
- Piskarev, A., Poselov, V., Kaminsky, V. (Eds.), 2019. Geologic Structures of the Arctic Basin. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77742-9
- Planke, S., Berndt, C., and Alvarez Zarikian, C.A., 2021. Expedition 396 Scientific Prospectus: Mid-Norwegian Continental Margin Magmatism. International Ocean Discovery Program. <u>https://doi.org/10.14379/iodp.sp.396.2021</u>
- Polteau, S., Hendriks, B.W.H., Planke, S., Ganerød, M., Corfu, F., Faleide, J.I., Midtkandal, I., Svensen, H.S., Myklebust, R., 2016. The Early Cretaceous Barents Sea Sill Complex: Distribution, 40Ar/39Ar geochronology, and implications for carbon gas formation. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 441, 83–95. <a href="https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.07.007">https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.07.007</a>
- Poselov, V.A., Avetisov, P., Butsenko, V.V., Zholondz, S.M., Zholondz, S.M., Pavlov, S.P., 2012. The Lomonosov Ridge as a natural extension of the Eurasian continental margin into the Arctic Basin. Russian Geology and Geophysics. 53, 1276–1290.
- Prokopiev, A. V., Ershova, V.B., Anfinson, O., Stockli, D., Powell, J., Khudoley, A.K., Vasiliev, D.A., Sobolev, N.N., Petrov, E.O., 2018. Tectonics of the New Siberian Islands archipelago: Structural styles and low-temperature thermochronology. J. Geodyn. 121, 155–184. https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.09.001
- Rekant, P., Sobolev, N., Portnov, A., Belyatsky, B., Dipre, G., Pakhalko, A., Kaban'kov, V., Andreeva, I., 2019. Basement segmentation and tectonic structure of the Lomonosov Ridge, arctic Ocean: Insights from bedrock geochronology. J. Geodyn. 128, 38–54. https://doi.org/10.1016/j.jog.2019.05.001
- Rogov, M.A., Ershova, V.B., Shchepetova, E. V., Zakharov, V.A., Pokrovsky, B.G., Khudoley, A.K., 2017. Earliest Cretaceous (late Berriasian) glendonites from Northeast Siberia revise the timing of initiation of transient Early Cretaceous cooling in the high latitudes. Cretac.

Res. 71, 102–112. https://doi.org/10.1016/j.cretres.2016.11.011

- Saltus, R.W., Miller, E.L., Gaina, C., Brown, P.J., 2011. Chapter 4 Regional magnetic domains of the Circum-Arctic: a framework for geodynamic interpretation. Geol. Soc. London, Mem. 35, 49–60. https://doi.org/10.1144/M35.4
- Schröder-Adams, C. 2014. The Cretaceous Polar and Western Interior seas: paleoenvironmental history and paleoceanographic linkages. Sedimentary Geology, 301, 26–40. http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2013.12.003
- Schröder-Adams, C.J., Herrle, J.O., Embry, A.F., Haggart, J.W., Galloway, J.M., Pugh, A.T., Harwood, D.M., 2014. Aptian to Santonian foraminiferal biostratigraphy and paleoenvironmental change in the Sverdrup Basin as revealed at Glacier Fiord, Axel Heiberg Island, Canadian Arctic Archipelago. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 413, 81–100. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.03.010
- Sherwood, K.W., Johnson, P.P., Craig, J.D., Zerwick, S.A., Lothamer, R.T., Thurston, D.K., and Hurlbert, S.B., 2002, Structure and stratigraphy of the Hanna Trough, U.S. Chukchi Shelf, Alaska, *in* Miller, E.L., Grantz, A., and Klemperer, S.L., eds., Tectonic Evolution of the Bering Shelf–Chukchi Sea–Arctic Margin and Adjacent Landmasses: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 360, p. 39–66.
- Shimeld, J., Boggild, K., Mosher, D.C., and Jackson, H.R., 2021. 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 .zip file. <u>https://doi.org/10.4095/329248</u>
- Shipilov, E.V., 2016. Basaltic magmatism and strike-slip tectonics in the Arctic margin of Eurasia: evidence for the early stage of geodynamic evolution of the Amerasia Basin. Russ. Geol. Geophys. 57, 1668–1687. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.04.007
- Skolotnev, S., Aleksandrova, G., Isakova, T., Tolmacheva, T., Kurilenko, A., Raevskaya, E., Rozhnov, S., Petrov, E., Korniychuk, A., 2019. Fossils from seabed bedrocks: Implications for the nature of the acoustic basement of the Mendeleev Rise (Arctic Ocean). Mar. Geol. 407, 148–163. <u>https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.11.002</u>
- Sokolov, S. D., Bondarenko G. Ye., Layer P. W., and Kravchenko-Berezhnoy I. R. 2009. South Anyui suture: tectono-stratigraphy, deformations, and principal tectonic events // in D. B. Stone, K. Fujita, P. W. Layer, and E. L. Miller, A. V. Prokopiev, and J. Toro (eds.), Geology, geophysics and tectonics of Northeastern Russia: a tribute to Leonid Parfenov,

European Geosciences Union, Stephan Mueller Publication Series, v. 4, p. 201–221

- Startseva, K.F., Nikishin, A.M., Malyshev, N.A., Nikishin, V.A., Valyuhcheva, A.A. 2017. Geological and Geodynamic Reconstruction of the East Barents Megabasin from Analysis of the 4–AR Regional Seismic Profile. *Geotectonics, Vol. 51, No. 4, pp. 383–397.* DOI: 10.1134/S0016852117030104
- Stein, R., 2008. Arctic Ocean Sediments: Processes, Proxies, and Paleoenvironment, Volume 2, 1st Edition. Elsevier Science. <u>https://www.sciencedirect.com/bookseries/developments-in-marine-geology/vol/2</u>
- Struijk, E.L.M., Tesauro, M., Lebedeva-Ivanova, N., Gaina, C., Beekman, F., Cloetingh, S., 2018. The Arctic lithosphere: Thermo-mechanical structure and effective elastic thickness. Global Planet. Change, 171, 2–17. <u>https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.014</u>
- Tuchkova M.I., Shokalsky S.P., Petrov O.V., Sokolov S.D., Sergeev S.A. & Moiseev A.V. Triassic deposits of Chukotka, Wrangel Island and Mendeleev Rise, Arctic Sea: sedimentology and geodynamic implications // GFF. 2020. 142 (2). P. 158–168. doi https://doi.org/10.1080/11035897.2020.1724668
- Tuchkova M.I., Sokolov S.D., Khudoley A.K., Verzhbitsky V.E., Hayasaka Y., Moiseev A.V. Permian and Triassic deposits of Siberian and Chukotka passive margins: sedimentation setting and provenance – ICAM VI Proceedings. 2014. P. 61–96.
- Vernikovsky V.A., Vernikivskaya A., Proskurnin V., Vatushkin N., Proskurnina M., Kadilnikov P., Larionov A., Travin A. 2020. Late Paleozoic–Early Mesozoic Granite Magmatism on the Arctic Margin of the Siberian Craton during the Kara-Siberia Oblique Collision and Plume Events. Minerals, 10, 571; doi:10.3390/min10060571
- Vernikovsky, V.A., Dobretsov, N.L., Metelkin, D.V., Matushkin, N.Y., Koulakov, I.Y., 2013. Concerning tectonics and the tectonic evolution of the Arctic. Russ. Geol. Geophys. 54, 838–858. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.07.006
- Vernikovsky, V.A., Morozov, A.F., Petrov, O. V., Travin, A. V., Kashubin, S.N., Shokal'sky, S.P., Shevchenko, S.S., Petrov, E.O., 2014. New data on the age of dolerites and basalts of Mendeleev Rise (Arctic Ocean). Doklady Earth Sci. 454, 97–101. https://doi.org/10.1134/S1028334X1402007X
- Verzhbitsky V. E., Sokolov S.D., Frantzen E. M., Little A., Tuchkova M. I., and Lobkovsky L.I., 2012, The South Chukchi Sedimentary Basin (Chukchi Sea, Russian Arctic): Age,

structural pattern, and hydrocarbon potential, in D. Gao, ed., Tectonics and sedimentation: Implications for petroleum systems: AAPG Memoir 100, p. 267 – 290.

- Weigelt, E., Franke, D., Jokat, W., 2014. Seismostratigraphy of the Siberian Arctic Ocean and adjacent Laptev Sea Shelf. J. Geophys. Res. 119 (7), 5275–5289. http://dx.doi.org/10.1002/2013JB010727.
- Weigelt, E., Jokat, W., Eisermann, H. 2020. Deposition history and paleo-current activity on the southeastern Lomonosov Ridge and its Eurasian flank based on seismic data. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 21, e2020GC009133. <u>https://doi.org/10.1029/2020GC009133</u>
- Westerhold, T., Marwan, N., Drury, A.J., Liebrand, D., Agnini, C., Anagnostou, E., Barnet, J.S.K., et al., 2020. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science*, 369(6509):1383–1387. <u>https://doi.org/10.1126/science.aba6853</u>
- Williamson, M.-C., Kellett, D., Miggins, D., Koppers, A., Carey, R., Oakey, G., Weis, D., Jokat, W., Massey, E. 2019. Age and Eruptive Style of Volcanic Rocks Dredged from the Alpha Ridge, Arctic Ocean. Geophysical Research Abstracts. Vol. 21, EGU2019-6336, 2019.
  EGU General Assembly 2019