

СТРОЕНИЕ КОРЫ ПОДНЯТИЯ МЕНДЕЛЕЕВА В АРКТИЧЕСКОМ ОКЕАНЕ: СИНТЕЗ ДАННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ И ОПРОБОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Анатолий Михайлович Никишин^{1✉}, Сергей Геннадьевич Сколотнев²,
Джиллиан Роуз Фулджер³, Елизавета Андреевна Родина⁴,
Ксения Федоровна Алёшина⁵, Хенри Уильям Посаментьер⁶,
Андрей Алексеевич Черных⁷

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

² Геологический Институт РАН, Москва, Россия; sg_skol@mail.ru

³ Университет Дарема, Дарем, Великобритания; g.r.foulger@durham.ac.uk, <https://orcid.org/0000-0001-6943-6214>

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; rodina_liza@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3381-7326>

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kfstartseva@gmail.com

⁶ ООО «Геонауки», Калифорния, США; hposamen1@gmail.com

⁷ ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия; a.a.chernykh@vniio.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5370-8593>

Аннотация. Поднятие Менделеева находится в Амеразийском бассейне Арктического океана. Работа основана на синтезе интерпретации региональных сейсмических профилей МОВ ОГТ 2Д и данных опробования горных пород с помощью специальных подводных аппаратов на склонах подводных гор и уступов. Поднятие представлено чередованием поднятий типа горстов и полуграбенов. В основании разрезов горстов выделяются яркие рефлекторы, которые интерпретируются как вулканиды. Разрезы полуграбенов имеют клиновидную форму в разрезе и по геометрии подобны последовательностям рефлекторов, наклоненных в сторону моря (seaward-dipping reflectors sequences (SDRs)) континентальных пассивных вулканических окраин. Опробование горных пород показало, что горсты сложены осадочными породами палеозоя, пронизанными интрузиями. На горстах выделены разрезы апта-альба с вулканидами (базальты, трахибазальты, трахиандезиты). U/Pb датирование магматических пород показало, что типичный возраст пород составляет 110–114 млн лет. Магматические породы содержат цирконы с возрастными от до-барремского мезозоя до палеозоя и докембрия. Эти цирконы были захвачены базальтовой магмой при ее движении вверх. Наличие этих древних цирконов указывает на то, что поднятие Менделеева сложено континентальной корой. Предложена модель строения коры поднятия Менделеева. В основании видимого на сейсмических профилях разреза преобладают вулканиды (на горстах от базальтов до трахиандезитов, в полуграбенах в основном базальты). Верхняя и нижняя кора примерно на 20–30% насыщена интрузиями основного состава. В основании коры выделяется высокоскоростной слой толщиной до 5 км. Предполагается, что его нижняя часть целиком представлена интрузиями типа габбро, а верхняя часть — это самая нижняя часть нижней коры, максимально насыщенная интрузиями.

Ключевые слова: поднятие Менделеева, SDR, сейсмостратиграфия, U/Pb датирование возраста, Арктика, строение коры, магматизм

Для цитирования: Никишин А.М., Сколотнев С.Г., Фулджер Дж.Р., Родина Е.А., Алёшина К.Ф., Посаментьер Х.У., Черных А.А. Строение коры поднятия Менделеева в Арктическом океане: синтез данных сейсморазведки и опробования горных пород // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 6. С. 3–15.

CRUSTAL STRUCTURE OF THE MENDELEEV RISE IN THE ARCTIC OCEAN: A SYNTHESIS OF SEISMIC PROFILES AND ROCK SAMPLING DATA

Anatoliy M. Nikishin^{1✉}, Sergey G. Skolotnev², Gillian R. Foulger³,
Elizaveta A. Rodina⁴, Kseniya F. Aleshina⁵, Henry W. Posamentier⁶,
Andrey A. Chernykh⁷

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

² Geological Institute RAS, Moscow, Russia; sg_skol@mail.ru

³ Durham University, Durham, U.K.; g.r.foulger@durham.ac.uk, <https://orcid.org/0000-0001-6943-6214>

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; rodina_liza@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3381-7326>

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kfstartseva@gmail.com

⁶ LLC Geosciences, California, USA; hposamen1@gmail.com

⁷ VNIIOkeanogeologiya, St. Petersburg, Russia; a.a.chernykh@vniio.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5370-8593>

Abstract. The Mendeleev Rise is located in the Amerasia Basin of the Arctic Ocean. The work is based on a synthesis of interpretation of regional seismic profiles of the OGT 2D DOM and data from rock sampling using

special underwater vehicles on the slopes of seamounts and scarps. The uplift is represented by alternation of highs (horsts) and half-grabens. At the base of the horst sections, bright reflectors are distinguished, which are interpreted as volcanics. Half-graben sections are wedge-shaped in section and are similar in geometry to seaward-dipping reflectors (SDRs) of continental passive volcanic margins. Rock sampling has shown that the horsts are composed of sedimentary rocks of Palaeozoic age, penetrated by intrusions. Aptian-Albian sections with volcanics (basalts, trachybasalts, trachyandesites) were identified on the horsts. U/Pb dating of igneous rocks showed that typical age of rocks is 110–114 Ma. Magmatic Cretaceous rocks contain zircons with ages ranging from pre-Barremian Mesozoic to Palaeozoic and Precambrian. These zircons were captured by basaltic magma during its upward movement. The presence of these ancient zircons indicates that the Mendeleev Rise is composed of continental crust. A model of the crustal structure of the Mendeleev Rise is proposed. The base of the section visible on seismic profiles is dominated by volcanics (on horsts from basalts to trachyandesites, in half-grabens mainly basalts). The upper and lower crust is approximately 20–30% saturated with intrusions of basic composition. At the base of the crust, a high-velocity layer up to 5 km thick is distinguished. It is assumed that its lower part is entirely represented by gabbro-type intrusions, and the upper part is the lowest part of the lower crust, maximally saturated with intrusions.

Keywords: Mendeleev Rise, SDR, seismic stratigraphy, U/Pb age dating, Arctic, crustal structure, magmatism

For citation: Nikishin A.M., Skolotnev S.G., Foulger G.R., Rodina E.A., Aleshina K.F., Posamentier H.W., Chernykh A.A. Crustal structure of the Mendeleev Rise in the Arctic Ocean: a synthesis of seismic profiles and rock sampling data. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 6: 3–15. (In Russ.).

Введение. Геология Северного Ледовитого (Арктического) океана изучается давно специалистами всех приарктических и других государств. Неоценимый вклад в изучение геологии Арктики внесли многие советские исследователи. В 1982 г. была принята Конвенция ООН по морскому праву. С этого времени все прибрежные страны должны были обосновать внешние границы континентального шельфа согласно принятым соглашениям. Интенсивность изучения Арктического океана существенно возросла. В России с 2005 г. стал официально действовать Арктический Мега-Проект, финансируемый государством. Детали этого проекта описаны в ряде публикаций [Piskarev et al., 2019; Petrov, Smelror, 2021; Nikishin et al., 2021a,b,c; Никишин и др., 2022]. В частности, в его рамках был получен большой объем сейсмических, гравитационных и магнитометрических данных. Сейсморазведка выполнялась в разных модификациях, что позволило изучить детально верхнюю часть осадочного чехла, весь осадочный чехол и глубинные горизонты земной коры. Полученный объем информации до сих пор еще не проанализирован в полной мере. Кроме этого, широко использовалось драгирование дна океана с целью взятия образцов пород [Kossovaya et al., 2018; Petrov, Smelror, 2021]. Вследствие широкого распространения ледового разноса каменного материала в Арктическом океане, вначале у специалистов не было уверенности, что собранный материал хотя бы частично имеет коренное происхождение. Поэтому, позднее было принято решение о взятии образцов коренных пород поднятия Менделеева с помощью специальных подводных аппаратов. Результаты всех этих геофизических и геологических работ суммированы в данной статье.

Краткий геологический обзор. На рис. 1 представлена карта рельефа (батиметрии) Арктического океана. В Арктическом океане выделяются Евразийский и Амеразийский мегабассейны, разделенные хребтом Ломоносова. В Амеразийском мегабассейне на юге выделяется Канадский бассейн, а на севере —

пояс подводных возвышенностей поднятия Менделеева и хребта Альфа, которые вместе образуют поднятие Альфа-Менделеева без четких границ между этими структурами. Параллельно поднятию Альфа-Менделеева проходят два пояса относительно глубоководных бассейнов: пояс бассейнов Подводников-Макарова и пояс бассейнов Толля-Менделеева-Наутилус-Стефанссона. Подробный геологический обзор представлен в [Никишин и др., 2022]. Ранее было широко принято, что вся область Амеразийского бассейна имеет океаническую кору, а поднятие Альфа-Менделеева является океаническим плато исландского типа с утолщенной базальтовой корой, например, [Gratnz et al., 2011]. Большинство исследователей принимает мезозойский возраст формирования Амеразийского бассейна, однако, ранее считалось, что кора имеет юрско-меловой возраст, а в настоящее время в большинстве публикаций обосновывается ее раннемеловой возраст [Petrov, Smelror, 2019; Døssing et al., 2017; Nikishin et al., 2021c, 2023; Mosher et al., 2023]. Также, в последние годы стала доминировать точка зрения о том, что поднятие Альфа-Менделеева сформировано на континентальной коре, претерпевшей значительное растяжение и внедрение большого количества базальтового материала [Kashubin et al., 2018; Petrov, Smelror, 2021; Piskarev et al., 2019; Skolotnev et al., 2019; Nikishin et al., 2023]. В результате, кора поднятия, вероятно, представлена смесью континентального и базальтового материала [Jackson, Chain, 2019]. Возраст коры поднятия Альфа-Менделеева большинством авторов принимается меловым.

В Арктическом регионе традиционно выделяется Большая магматическая провинция Высокой Арктики (High-Arctic Large Igneous Province-HALIP), например, [Oakey, Saltus, 2016; Døssing et al., 2017; Petrov, Smelror, 2019]. Эта магматическая суперпровинция включает трапповые базальтовые области Земли Франца Иосифа, Шпицбергена, северную часть островов Канадского архипелага, район островов Де-Лонга. В океане по геофизическим

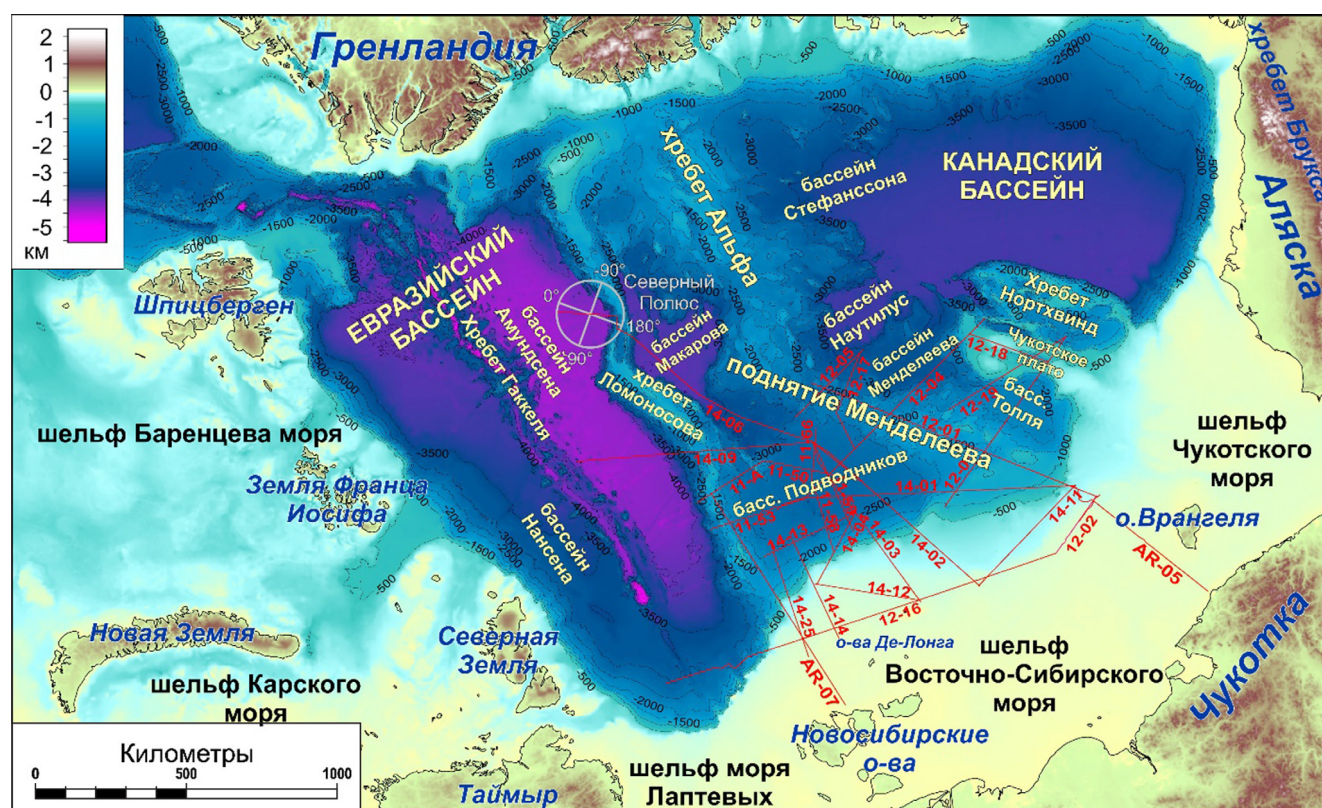


Рис. 1. Топография и батиметрия Арктического региона [Jakobsson et al., 2020]. Красными линиями показаны российские сейсмические профили и их номера, использованные в работе

данным выделены вулканические плато на хребте Ломоносова, севернее острова Врангеля и в других местах. Принято считать, что вся область поднятия Альфа-Менделеева и большая часть сопряженных относительно глубоководных бассейнов охвачены провинцией HALIP и в строении их коры присутствуют ее магматические породы. Традиционно считается, что HALIP формировалась примерно 130–80 млн лет назад с максимальной магматической активностью между 125 и 100 млн лет назад [Nikishin et al., 2023]. Обзор данных представлен в [Никишин и др., 2022].

Данные и методы. В данной работе мы используем два основных метода: 1 — интерпретация региональных сейсмических профилей МОВ ОГТ 2Д; 2 — анализ магматических горных пород, отобранных на склонах подводных гор поднятия Менделеева.

Основной объем сейсмических профилей, характеризующих поднятие Менделеева, был получен в ходе экспедиции «Арктика-2012». Полевые работы выполнялись АО «Севморгео» с бортов атомного ледокола «Капитан Драницин» и научно-исследовательского судна «Диксон». Некоторые технические детали сейсморазведочных работ представлены в [Nikishin et al., 2021a]. Положение отработанных профилей показано на рис. 1.

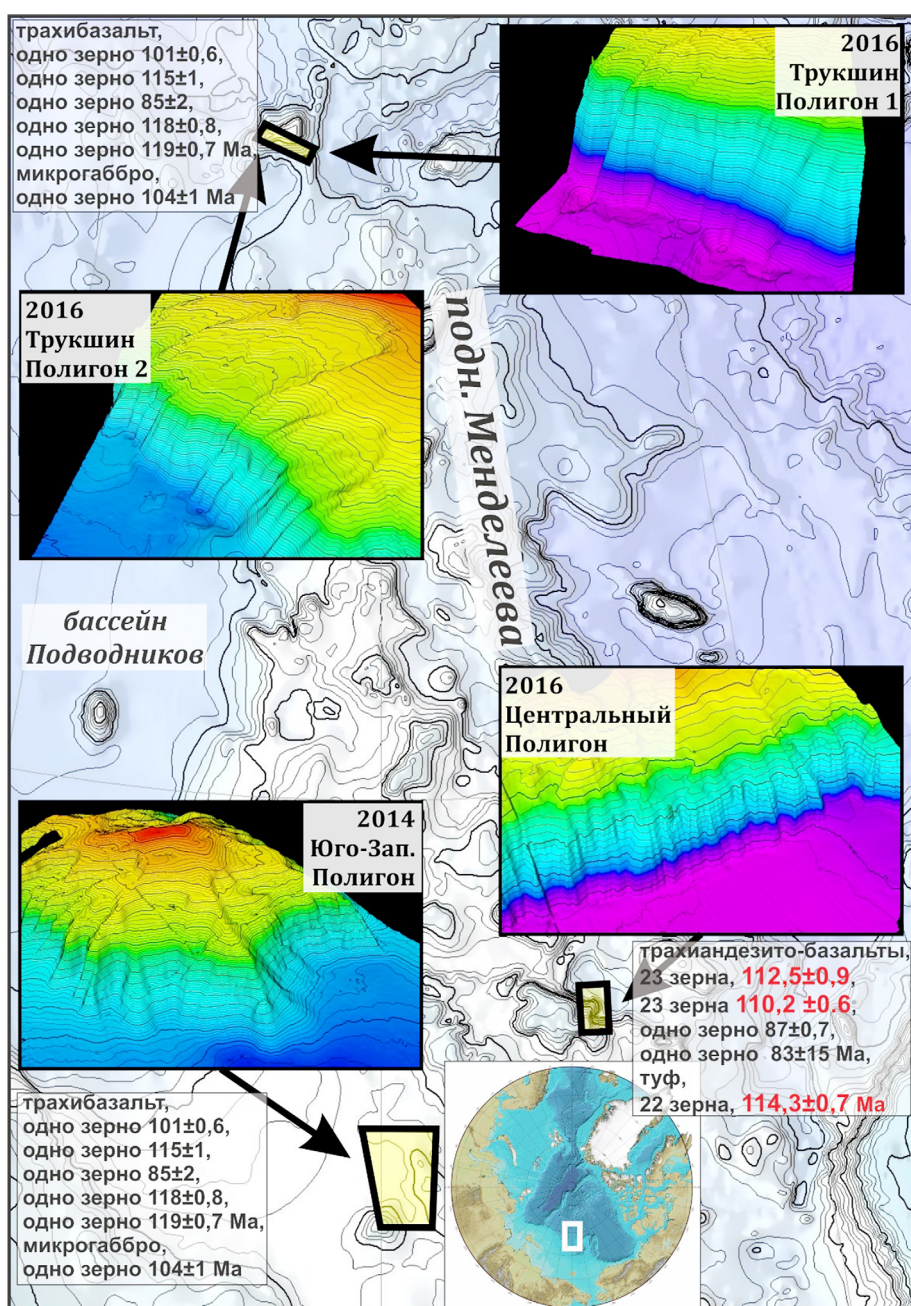
Для изучения горных пород, слагающих поднятие Менделеева, совместными усилиями МПР РФ и Роснедра (с подведомственными институтами),

МО России, ЗАО «Геослужба ГИН РАН» и Геологическим институтом РАН были организованы экспедиции «Менделеев-2014» и «Менделеев-2016». В рамках экспедиций применялись специальные подводные аппараты, с помощью которых выполнялся отбор коренных пород. Методика отбора показана на рис. 2 и 3 и описана в работах [Сколотнев и др., 2017; Nikishin et al., 2021a]. Всего было обследовано три подводных горы, в том числе два склона на горе Трушкина (рис. 4). Детали проведения экспедиции представлены в работах [Skolotnev et al., 2017, 2019, 2022; Nikishin et al., 2021a].

Сейсмическая стратиграфия для Арктического океана была обоснована ранее и представлена в работах [Nikishin et al., 2021b, Nikishin et al., 2023; Никишин и др. 2022]. Для района поднятия Менделеева на основе метода тектоностратиграфии выделены опорные сейсмические горизонты с примерными возрастными 125, 100, 80, 66, 56, 45, 34 и 20 млн лет.

Результаты. Доступный объем данных МОВ ОГТ 2Д был тщательно проанализирован и проинтерпретирован с целью установления особенностей тектонической эволюции поднятия Менделеева. Пример выполненной интерпретации сейсмического разреза показан на рис. 5, другие разрезы опубликованы в работах [Nikishin et al., 2021b, 2023; Rodina et al., 2022; Никишин и др., 2022]. Главной характеристикой поднятия Менделеева, установленной по данным МОВ ОГТ, является наличие в его строении чередования полутрабенгов и разделяющих их подня-

Рис. 4. 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., 2020]. Более детальная батиметрия для полигонов представлена МПР РФ [Skolotnev et al., 2019; Nikishin et al., 2021a]. Для каждого полигона написаны полученные изотопные U/Pb возраста магматических пород в млн. лет; по [Сколотнев и др., 2023]. Красным цветом написаны наиболее надежные возраста для когерентных групп зерен



тий (горстов). Полутрабены обычно образованы синрифтовыми сейсмокомплексами треугольной формы в разрезе с многочисленными яркими рефлексорами. Такие треугольные сейсмокомплексы типичны для вулканических пассивных континентальных окраин и называются seaward dipping-reflectors (SDR, рефлексоры, наклоненные в сторону моря), например [Geoffroy et al., 2015]. Считается, что сейсмические комплексы SDR сложены базальтами с возможным чередованием с осадочными породами. Вулканизм, как показано многими исследователями, проходил либо в аэральной обстановке, либо в субаэральной обстановке мелкого моря [Geoffroy et al., 2015]. Внутри сейсмических комплексов SDR выделяются многочисленные тела типа даек и силлов. Последние типичны и для синрифтового комплекса. Для верхней части синрифтовых комплексов характерны вулканические постройки (рис. 5). В основании раз-

резов горстов типично наличие ярких рефлексоров, указывающих на вероятное наличие вулканического покрова [Rodina et al., 2022; Никишин и др., 2022].

Точки опробования горных пород на двух склонах подводной горы Трукшина поднятия Менделеева и для Юго-Западного полигона были привязаны к сейсмическим профилям (рис. 6). Привязка носит приблизительный характер, так как осуществлена исключительно с ориентировкой на зафиксированную глубину отбора образцов подводным аппаратом.

Для всех трех подводных гор характерны сходные разрезы пород [Skolotnev et al., 2019, 2022]. В разрезе подводных гор выделены три толщи. Нижняя (верхний ордовик-силур) толща сложена чистыми доломитами и доломитами с терригенной и биокластовой примесью, известняками с терригенной и биокластовой примесью и кварцитопесчаниками. Эти отложения накапливались в при-

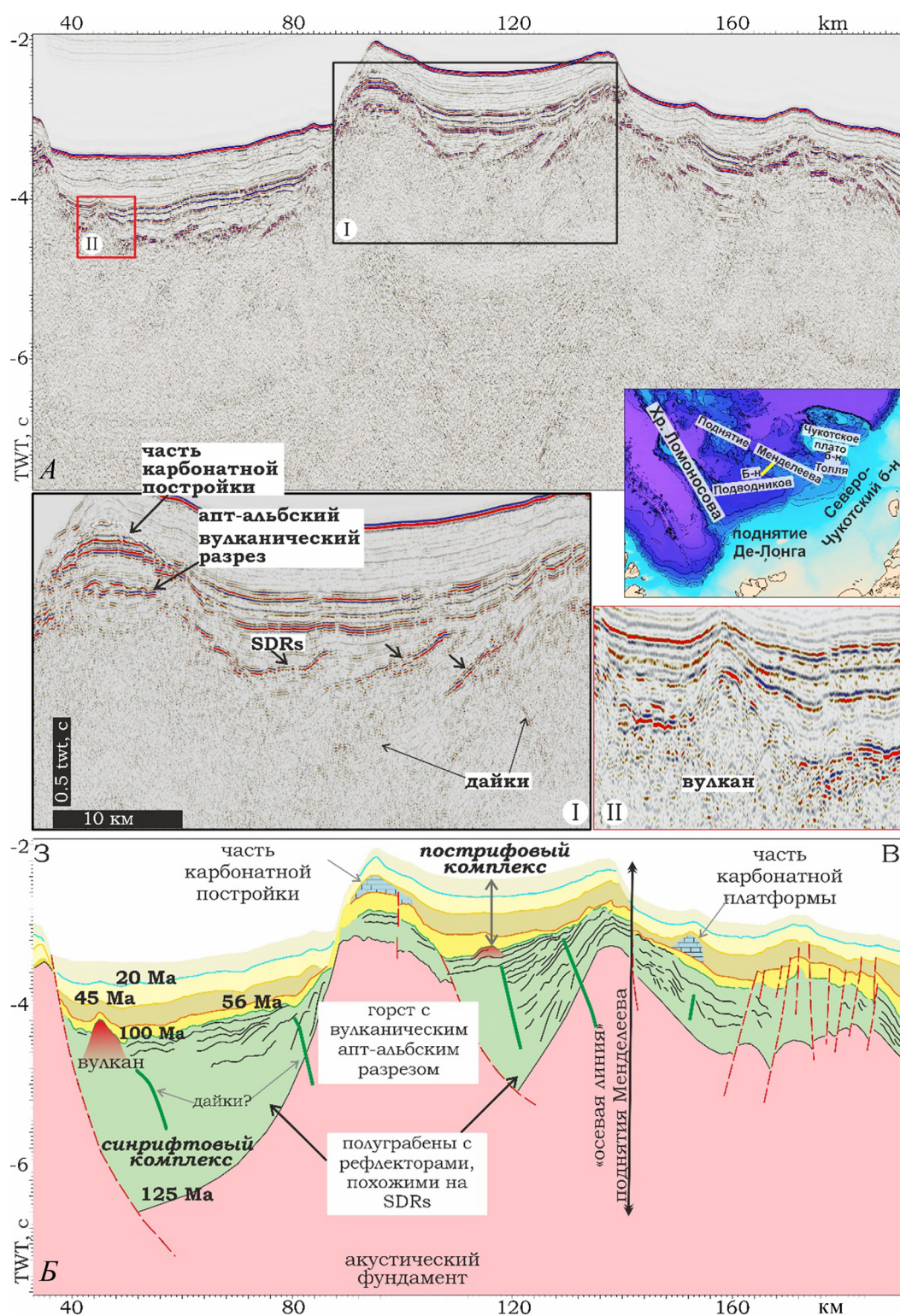


Рис. 5. Поднятие Менделеева: А — фрагмент сейсмического профиля ARC12-04 и Б — его интерпретация. Локация профиля указана на карте. Поднятие Менделеева имеет осевую линию, у которой направление падения рефлекторов меняется на противоположное. По [Родина и др., 2022 с изменениями]

брежных и мелководных шельфовых обстановках тропического моря, связанных с карбонатными платформами, соседствующими с участками речного стока. В составе средней толщи (средний-верхний девон) принимают участие известняки с терригенной и биокластовой примесью, а также кварц-полевошпатовые песчаники, накапливавшиеся в прибрежных и мелководных обстановках тропического моря. Верхняя толща (нижний мел) во всех трех разрезах представлена известковистыми, глинистыми и известково-глинистыми песчани-

ками, формирование которых происходило в мелководных морских условиях. Для меловой толщи во всех трех разрезах типичны вулканы и туфы. Нижняя и средняя толщи на сейсмических профилях слагают акустический фундамент, и их структура не выявляется. Верхняя меловая толща образует региональный чехол, который четко распознается на сейсмических профилях (рис. 6). В палеозойских отложениях в результате взятия проб горных пород выявлено большое количество интрузивных тел базальтового (габбрового) состава.

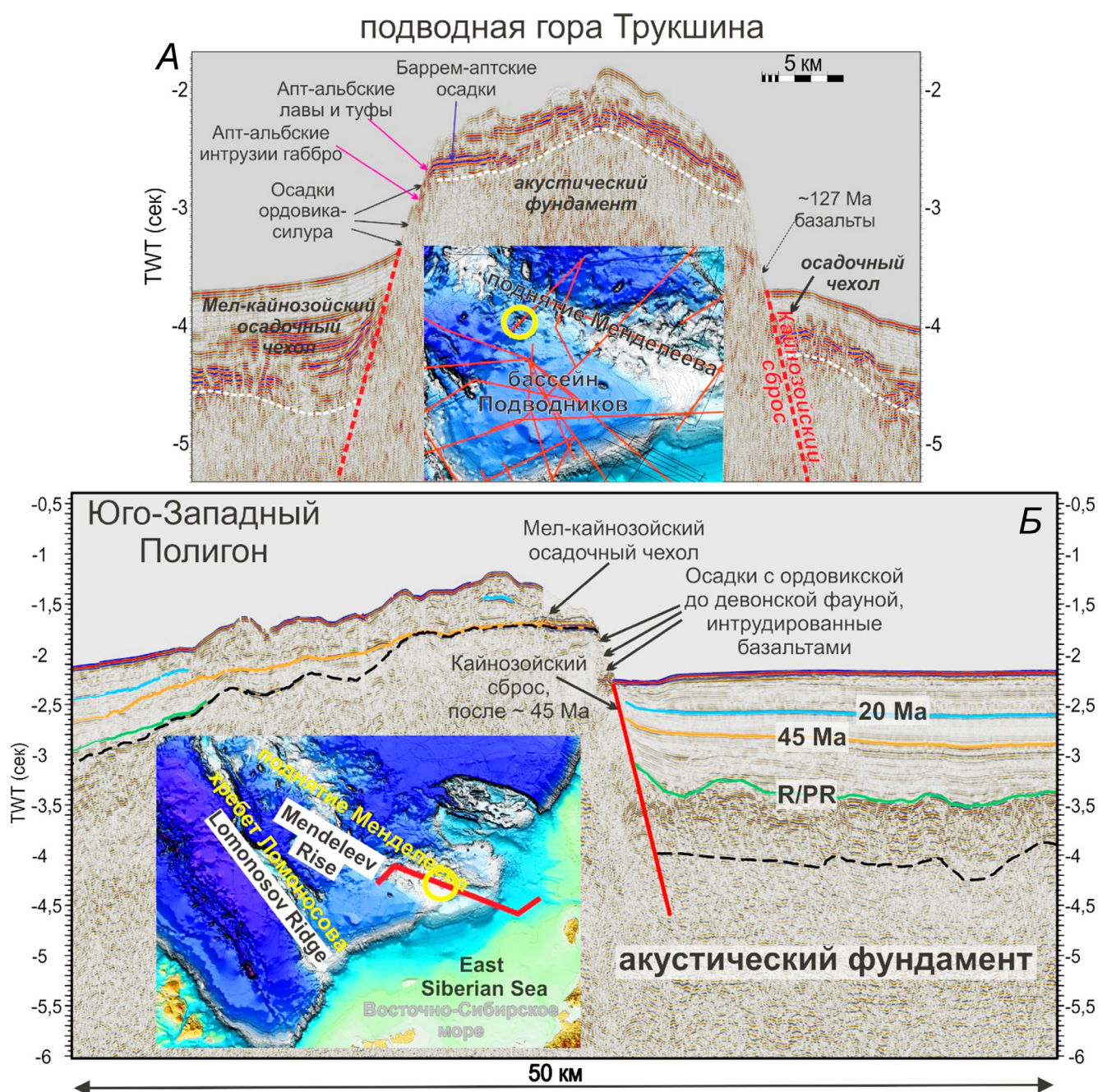


Рис. 6. А — фрагмент сейсмического профиля ARC-12-05 для подводной горы Трукшин. Локация профиля показана на карте кружком; Б — интерпретация фрагмента сейсмического профиля ARC 12-01 для района поднятия Менделеева. Локация профиля показана на карте кружком. На этих склонах были взяты образцы горных пород С.Г. Сколотневым с помощью специальных подводных аппаратов. Примерное положение взятия проб горных пород показано стрелками. Показаны сейсмические горизонты с их вероятными возрастными. Возраста пород в основном по С.Г. Сколотневу и др. [Skolotnev et al., 2019; Сколотнев и др., 2022]. По [Nikishin et al., 2021a, с изменениями]

С.Г. Сколотнев и др. [2023] провели анализ собранных магматических пород поднятия Менделеева методом U/Pb изотопной геохронологии цирконов. Породы представлены как чехлом на подводных поднятиях, так и интрузивными телами. Среди изученных пород выделены 2 группы: 1) базальты и микрогаббро нормальной щелочности; 2) трахибазальты, трахиандезиты, трахиандезитобазальты и их туфы, совокупно образующие единый ряд дифференциации пород умеренной щелочности. Вероятные интрузии образованы микрогаббро

и трахиандезитами. Следует отметить, что для склонов подводных гор, на которых были взяты образцы, вероятны оползневые процессы, поэтому породы, взятые на склонах, могли быть перемещены из их коренного положения. Склоны подводных гор образованы кайнозойскими сбросами, по которым породы также могли быть перемещены.

При анализе горных пород зерна циркона для U/Pb датирования были выделены по стандартной методике в Геологическом институте РАН. U-Th-Pb изотопный анализ производился на ионном микро-

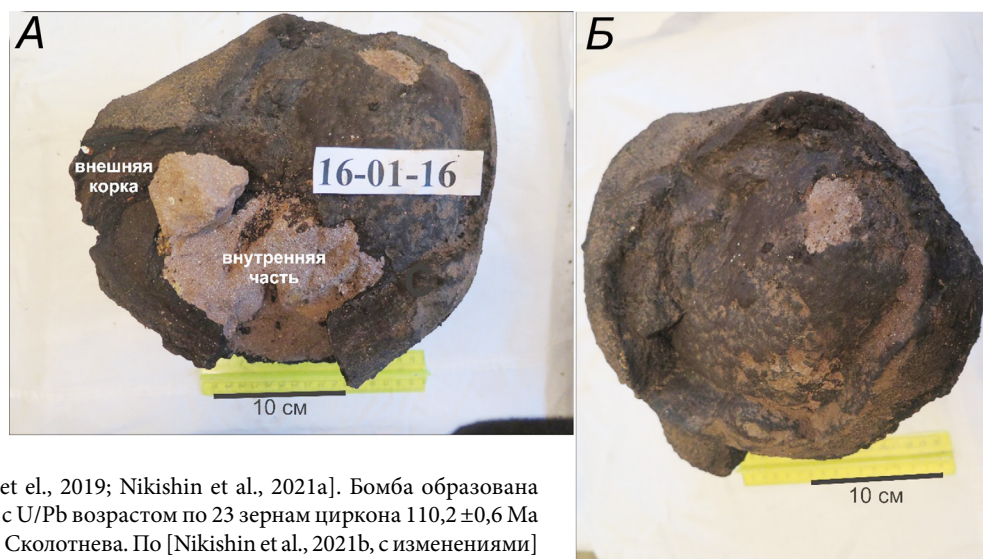


Рис. 7. Фото одной вулканической бомбы с двух сторон (А, Б) (образец 1001/16). Бомба была отобрана в 2016 г. на поднятии Менделеева (Центральный Полигон; 79° 01,3' N, 174° 53,3' W, глубина воды 1960 м) с использованием специального подводного оборудования [Skolotnev et al., 2019; Nikishin et al., 2021a]. Бомба образована базальтовыми трахиандезитами с U/Pb возрастом по 23 зернам циркона $110,2 \pm 0,6$ Ma [Сколотнев и др., 2023]. Фото С.Г. Сколотнева. По [Nikishin et al., 2021b, с изменениями]

зонде SHRIMP-RG в Исследовательской школе наук о Земле Австралийского национального университета (Канберра).

Для вулканических пород умеренной щелочности получены следующие U/Pb изотопные возраста для когерентных групп зерен: в трахиандезитах по 23 зернам получен средний возраст $112,5 \pm 0,9$ млн лет и по 23 зерну $110,2 \pm 0,6$ млн лет. По туфам по 22 зерну получен средний возраст $114,3 \pm 0,7$ млн лет. Все данные пробы относятся к Центральному полигону (рис. 4). По отдельным зернам получены возраста $111 \pm 0,8$, 104 ± 1 , $118 \pm 0,8$ и $119 \pm 0,7$ млн лет (рис. 4). В целом, типичный возраст магматических пород 110–114 млн лет. Образец 1601/16 оказался вулканической бомбой с изотопным возрастом $110,2 \pm 0,6$ млн лет (рис. 7). Вулканические породы чехла являются существенно пористыми породами, формировавшимися либо на суше, либо в мелководно-морских обстановках. Наличие вулканической бомбы однозначно свидетельствует о наличии вулканов на суше.

Несколько анализированных цирконов имеют более молодые U/Pb возраста. В пробе 1601/21 (Центральный полигон) имеется два зерна с возрастами $87 \pm 0,7$ и 83 ± 15 млн лет, остальные — в интервале 134–2475 млн лет. В пробе 1602/5 (гора Трукшина) три зерна имеют возраста 85 ± 2 , $118 \pm 0,8$ и $119 \pm 0,7$ млн лет, остальные зерна имеют возраста в диапазоне от 139–163 млн лет до палеозоя и докембрия. Их интерпретация не однозначна: либо была более молодая фаза магматизма, либо, как предполагается в работе [Сколотнев и др., 2023], более древние цирконы испытали перекристаллизацию в позднем мелу. В песчаниках осадочного разреза поднятия Менделеева выделены детритовые цирконы с возрастами около 120 Ma. Это указывает на то, что седиментация осадочных пород, вероятно, проходила синхронно с вулканизмом. U/Pb датирование меловых магматических пород поднятия Менделеева показало, что в них имеется большое количество цирконов палеозойского и докембрийского возраста. Получены следующие датировки

для разных образцов: 295–622, 412–1677, 141–1830, 491 ± 4 , 508 ± 4 , 131–152, 560 ± 6 , 905 ± 24 , $428,2 \pm 2,8$, 139–162, 241–274, 401–2641, 196–1862, 250–1181, 2675, $1 \pm 11,6$, 298 ± 3 , 465 ± 7 , 134–2475, 635–1917 млн лет [Сколотнев и др., 2023]. Очевидно, что данные цирконы попали в меловую магму при ассимиляции вмещающих пород в ходе ее подъема. Наличие зерен цирконов с возрастами 131–152 и 139–162 млн лет может указывать на то, что ниже раннемелового чехла в акустический фундамент входит мезозойский до-барремский осадочный чехол с транспортом юрско-раннемеловых магматических цирконов из района Верхоянско-Чукотской области, для которой характерен магматизм этого возраста [Nikishin et al., 2021c]. Важно отметить, что в одном из туфов встречены исключительно одни архейские цирконы.

Как уже было сказано, определений возраста для полутрабенов с вероятными сейсмическими комплексами типа SDR данных нет. Детальное описание сейсмических комплексов SDR поднятия Менделеева представлено в работе [Rodina et al., 2022]. В волновом поле SDRs представляют собой комплексы высокоамплитудных, плоско-параллельных или изогнутых рефлекторов, образующих веерообразные клинья. Комплексы SDRs обычно имеют высокоамплитудную кровлю, которой присущ прилегающий характер границ. Подошва комплекса SDRs на сейсмических данных обычно неопределима. Предположительно, в основании комплексов SDRs находится детачмент или серия ограничивающих разломов [Geoffroy, 2005; Geoffroy et al., 2020; Planke et al., 2000]. Рефлекторы полого наклонены и омолаживаются в сторону «моря» (т.е. в сторону оси растяжения). Они могут простираться в стороны на сотни километров, а их мощность варьирует от 3–5 до 10, редко до 20 км [Planke et al., 2000]. Значения сейсмической скорости в комплексах SDRs обычно составляют от 3–4 км/с сверху разреза до 6,5 км/с внизу [Harkin et al., 2020]. Доступен небольшой объем скважинных данных для комплексов SDRs — преимущественно с окраин Исландии, Гренландии

и Норвегии [Eldholm et al., 1987; Planke et al., 1994; Abdelmalak et al., 2016; Meyer et al., 2009] и окраины Южной Америки [McDermott et al., 2018]. Известные наземные обнажения SDRs описаны в районах Дisko-Нунавик (Западная Гренландия) [Abdelmalak et al., 2019; Geoffroy, 2005] и Кэп-Дайер у Земли Баффины (Канада) [Skaarup et al., 2006]. По результатам анализа керн из скважин на шельфе и данных береговых исследований следует, что SDRs представлены субаэральными базальтовыми потоками. Слои базальтов переслаиваются с небольшим количеством вулканокластического и/или осадочного материала. Мощность отдельных базальтовых слоев может достигать 5–10 м [Abdelmalak et al., 2016]. Для SDR комплексов типичны силлы, которые дают яркие сейсмические отражения. Различают внутренние и внешние комплексы SDR [Geoffroy et al., 2015]. Внутренние SDR выполняют полуграбены на континентальной коре. В отношении внешних SDR, расположенных мористее, большинством считается, что они также формируются на континентальной коре, но дискуссия на этот счет продолжается [Geoffroy et al., 2022]. SDR комплексы поднятия Менделеева по морфологии похожи на внутренние SDR [Rodina et al., 2022; Nikishin et al., 2023].

В теории обычно считается, что при формировании SDR магматических комплексов сначала формируются базальтовые траппы (платобазальты), а далее происходит формирование полуграбена [Geoffroy et al., 2005]. Из этого следует, что SDR магматические комплексы могут быть моложе вулканитов на горстах, для которых есть изотопные определения возраста. Таким образом, магматические породы полуграбенов поднятия Менделеева могут быть несколько моложе ~110 млн лет. Статистических данных в отношении продолжительности формирования SDR комплексов на пассивных континентальных окраинах пока мало, но согласно опубликованным данным — это первые миллионы лет. Следовательно, возраст SDR комплексов поднятия Менделеева должен быть не древнее 100 млн лет.

С учетом всех новых данных была составлена обновленная схема хроностратиграфии для поднятия Менделеева (рис. 8).

Дискуссия. На основе анализа сейсмических профилей и полученных изотопных возрастов магматических пород возможно перейти к дискуссии о строении коры поднятия Менделеева. Поднятие сформировано на континентальной коре мощностью до 30–35 км [Kashubin et al., 2018]. На рис. 9 представлена модель глубинного строения, основанная на опубликованном глубинном разрезе из указанной работы. В основании коры мы выделили высокоскоростной слой толщиной до 5 км (High-Velocity Lower Crust (HVLC) — высокоскоростной слой в основании нижней коры) (рис. 9), характерный для пассивных вулканических окраин, например, [Lebedeva-Ivanova et al., 2019; Guan et al., 2019; Geoffroy et al., 2022]. Ранее, наличие данного

слоя интерпретировалось как результат магматического андерплейтинга, то есть как слой интрузий, вероятно, базальтового состава, которые внедрились на границе коры и мантии. В настоящее время не исключается, что этот слой может быть представлен низами нижней коры, высоконасыщенными интрузиями базальтового состава. Вероятно, обе модели могут быть справедливы: внизу слоя это может быть сплошная интрузия, а выше — нижний слой континентальной коры, максимально насыщенный интрузиями основного состава.

Чисто геофизические модели строения коры не всегда всеми считаются обоснованными и нуждаются в подкреплении дополнительными геологическими аргументами. В работе [Сколотнев и др., 2023] показано, что в меловых базальтах поднятия Менделеева имеется большое количество ксенокристов цирконов с возрастaми от 131 до 2675 млн лет, которые однозначно были захвачены из кристаллической коры. В то же время, наличие ксеногенных цирконов более молодого возраста, вплоть до 131 млн лет, позволяет осторожно предположить возможность присутствия в разрезе и до-барремского мезозойского осадочного чехла. В любом случае, новые данные о возрасте ксеногенных цирконов, выделенных из магматических пород, подтверждают континентальную природу коры поднятия Менделеева и ее до-ордовикский возраст (отложения ордовика доказаны в основании осадочного чехла [Skolotnev et al., 2019, 2022]). Установить возраст точнее в настоящее время представляется сложным. Судя по тому, что многие цирконы имеют возрастa близкие к 560–900 млн лет, тиманский (неопротерозойско-кембрийский) возраст коры у поднятия наиболее вероятен [Никишин и др., 2022]. Тиманиды широко развиты в Арктическом регионе [Nikishin et al., 2021c]. Наличие исключительно архейских цирконов в одном из образцов туфов можно объяснить либо наличием блока архейской коры в составе поднятия Менделеева, либо можно предположить, что эти цирконы позднее были перемыты и переотложены в более молодые отложения.

Внутренние вероятные SDR комплексы обнажены на суше, в частности — в Гренландии [Chauvet et al., 2019]. На ее западном побережье Баффинова залива SDR снизу вверх сложены [Chauvet et al., 2019; Guan et al., 2019]: маломощной толщей гиадокластитов, подушечных базальтов и субаэральных базальтов; мощной (до 4–5 км) толщей пикритов и базальтов; мощной (до 5 км) толщей пикритов, базальтов и туфов; верхней маломощной толщей трахитов и щелочных базальтов. Длительность формирования вулканического комплекса около 5–6 млн лет.

Для восточного побережья Гренландии хорошо описаны интрузивные комплексы, подстилающие вулканические комплексы слагающие внутренние SDR [Geoffroy, 2005; Guan, 2018]. Пример строения коры ниже вулканического комплекса SDR показан на рис. 10 [Guan, 2018]. Отчетливо видно, что фунда-

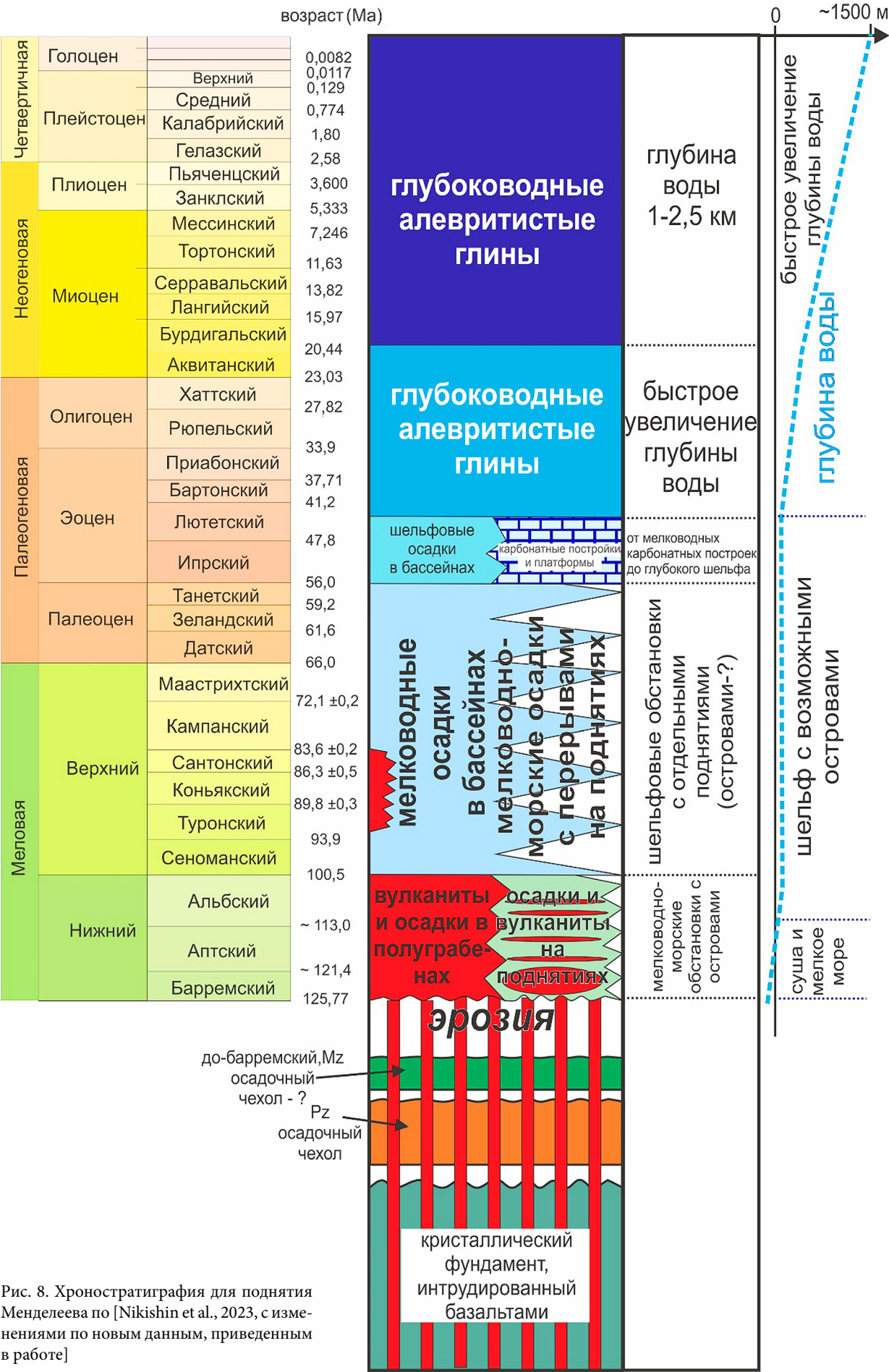


Рис. 8. Хроностратиграфия для поднятия Менделеева по [Nikishin et al., 2023, с изменениями по новым данным, приведенным в работе]

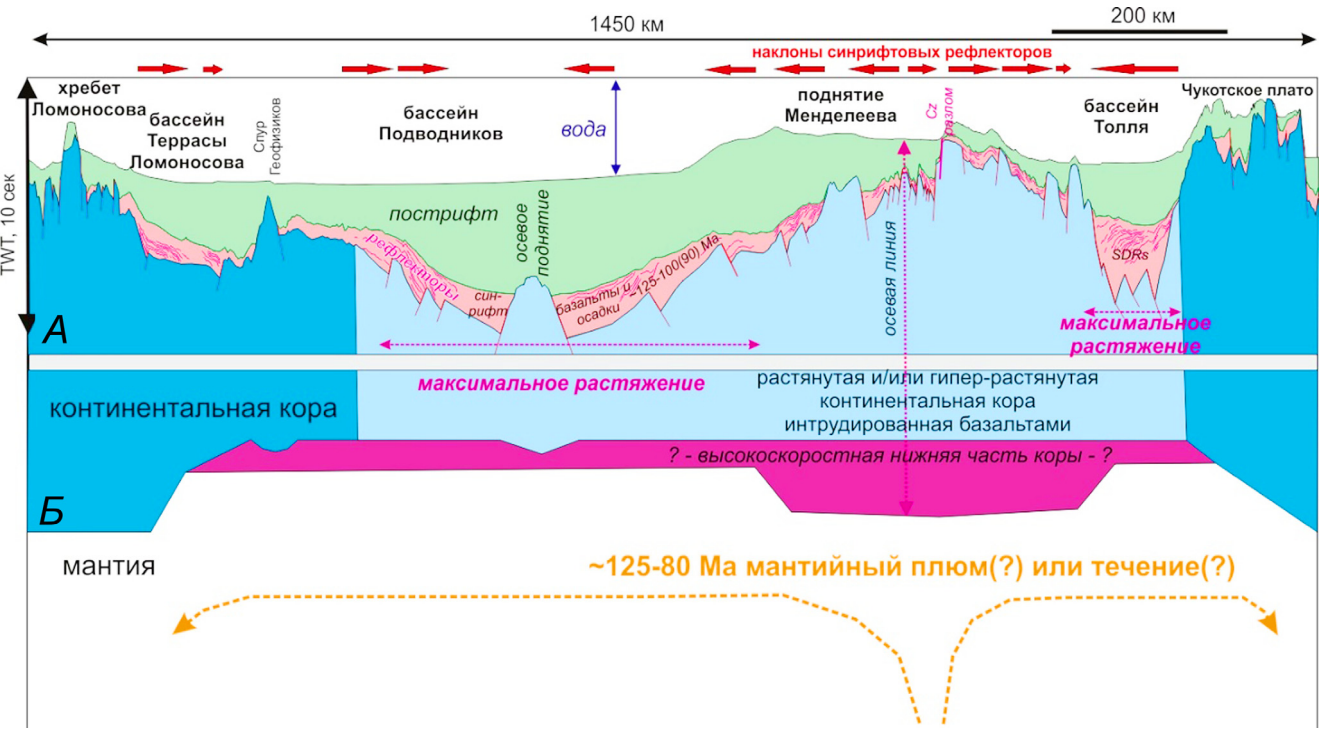


Рис. 9. Концептуальная модель строения коры поднятия Менделеева и сопряженных областей: А — интерпретация сейсмического профиля для верхней коры; В — модель строения нижней коры с учетом наших моделей. По [Nikishin et al., 2023, с изменениями]

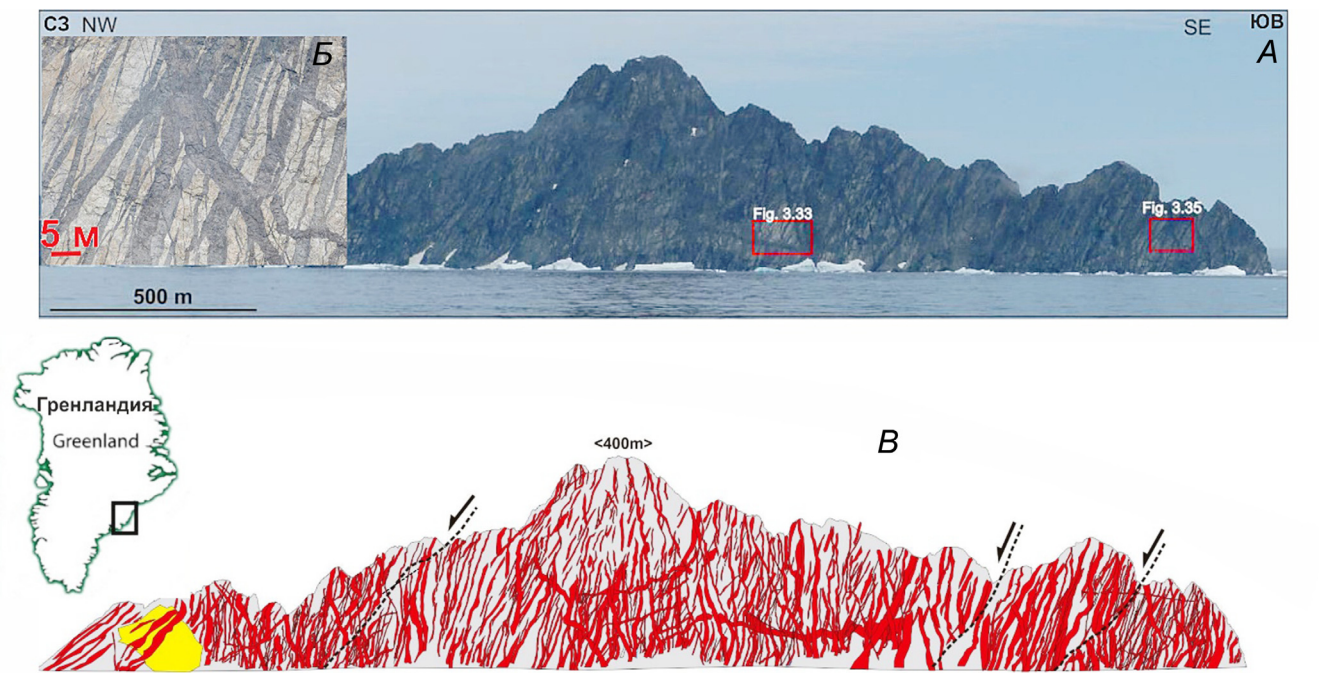


Рис. 10. Фотография обнажения (А) и его фрагмента (В) на восточном берегу Гренландии. Палеоценовые интрузии (Net-veined complex) в основном базальтового состава интродуцируют докембрийские гнейсы. В — интерпретация обнажения. Красным показаны интрузии. Фотографии и интерпретация по [Guan, 2018]

мент полуграбена насыщен огромным количеством интрузий с преобладанием даек и отдельных силлов. На представленной фотографии выделено более 410 даек. Типичная толщина даек и других интрузий — около 3–8 м. Основываясь, на данном примере, мы предполагаем, что верхняя кристаллическая кора поднятия Менделеева устроена примерно следующим образом: около 20–30% вещества коры

образованы интрузиями, в основном — базальтового состава. Суммируя все данные, мы представляем обновленную модель строения коры поднятия Менделеева, представленную на рис. 11.

Заключение. 1. В строении поднятия Менделеева преобладают горсты и полуграбены. Последние включают в себе сеймокомплексы SDR, вероятно представленные базальтами.

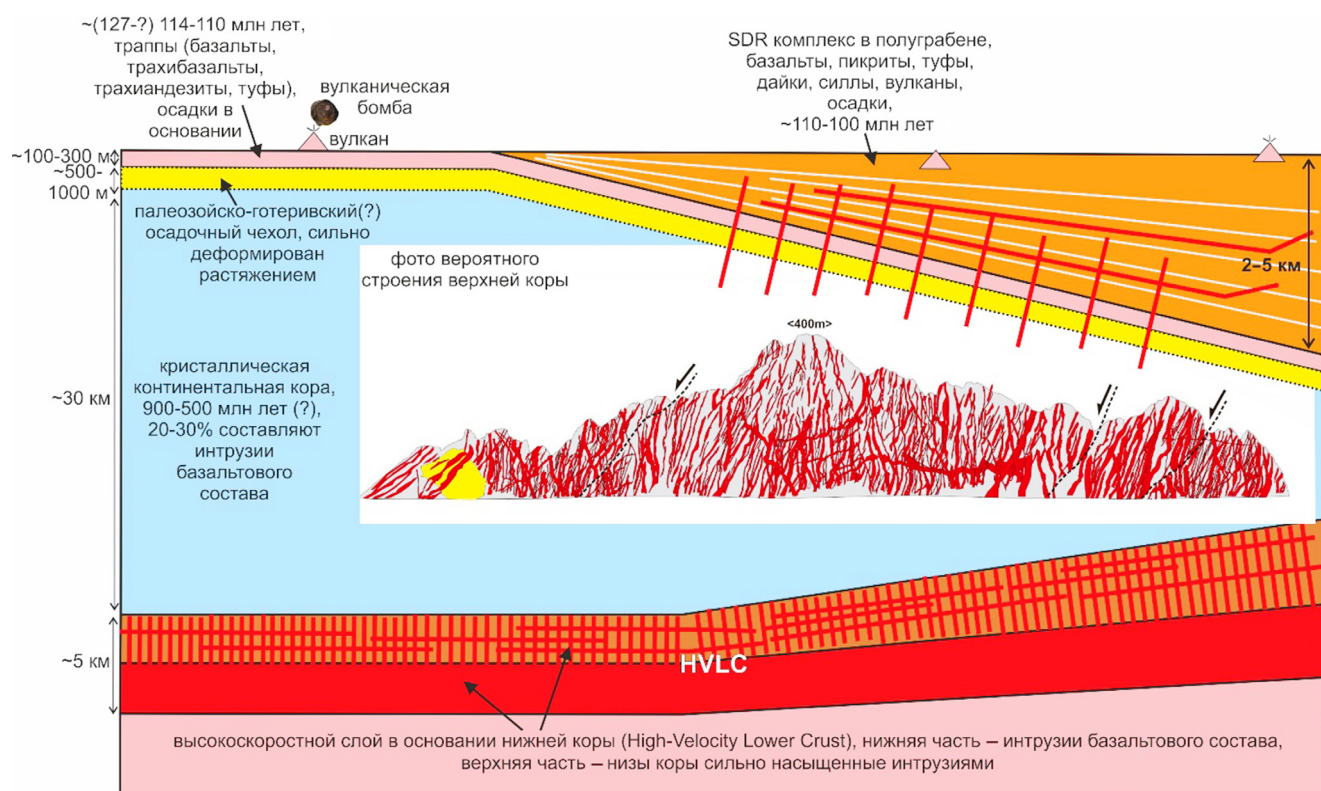


Рис. 11. Схематизированная немасштабная модель строения коры поднятия Менделеева

2. На относительных поднятиях (горстах) присутствует меловой вулканический чехол и большое количество интрузивных тел типа даек и силлов. Среди изученных меловых пород трахибазальты присутствуют в меньшинстве, преобладают трахиандезиты и трахиандезитобазальты.

3. U/Pb возраста вулканитов и интрузий в основном заключены в диапазоне 110–114 млн лет.

4. Так как SDR магматические комплексы обычно моложе траппов, то вероятный возраст SDR магматизма на поднятии Менделеева оценивается в 110–100 млн лет.

5. Вулканиты мелового возраста содержат ксенокриты цирконов с возрастными от 131 до 2675 млн лет. Эти цирконы были захвачены базальтовой магмой при ее движении вверх. Наличие этих древних цирконов указывает на то, что поднятие Менделеева сложено континентальной корой.

Благодарности. Авторы благодарны многим коллегам из ВНИИОкеангеология, ГИН РАН, ИО РАН, ИФЗ РАН, ВСЕГЕИ и ПАО «НК Роснефть» за дискуссии по геологии Арктики.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 22-27-00160).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никишин А.М., Петров Е.И., Старцева К.Ф. и др. Сейсмостратиграфия, палеогеография и палеотектоника Арктического глубоководного бассейна и его российских шельфов // Труды Геологического института РАН. Вып. 632. 2022. DOI: 10.54896/00023272_2022_632_1

2. Сколотнев, С.Г., Федонкин М.А., Петров Е.И., Корнийчук А.В. Новые данные о возрасте магматических пород поднятия Альфа-Менделеева (Северный Ледовитый океан) по результатам изотопного U/Pb датирования цирконов // Доклады РАН. Науки о Земле. 2023. (в печати)

3. Abdelmalak M.M., Meyer R., Planke S., et al. Prebreakup magmatism on the Voring margin: Insight from new sub-basalt imaging and results from Ocean Drilling Program Hole 642E // Tectonophysics. 2016. Vol. 675. P. 258–274. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.02.037>

4. Abdelmalak M.M., Planke S., Polteau S., et al. Breakup volcanism and plate tectonics in the NW Atlantic // Tectonophysics. 2019. Vol. 760. P. 267–296. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.08.002>

5. Chauvet F., Geoffroy L., Guillou H., et al. Eocene continental breakup in Baffin Bay // Tectonophysics. 2019. Vol. 757. P. 170–186. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.03.003>

6. Dossing A., Gaina C., Brozena J.M. Building and breaking a large igneous province: An example from the High Arctic // Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44. P. 6011–6019. DOI: 10.1002/2016GL072420

7. Eldholm O., Thiede J., Taylor A. Evolution of the Norwegian continental margin—background and objectives // Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results. 1987. Vol. 104. P. 5–25. URL: <https://doi.org/10.2973/odp.proc.ir.104.1987>

8. Geoffroy L., Chauvet F., Ringenbach J.-C. Middle-lower continental crust exhumed at the distal edges of volcanic passive margins // Communications Earth & Environment. 2022. Vol. 3. 95. URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00420-x>

9. Geoffroy L. Volcanic passive margins // Comptes Rendus Geosci. 2005. Vol. 337. P. 1395–1408. URL: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.10.006>

10. Geoffroy L., Burov E.B., Werner P. Volcanic passive margins: another way to break up continents. *Sci. Reports*. 2015. Vol. 5: 14828. DOI: 10.1038/srep14828
11. Geoffroy L., Guan H., Foulger G.R., Werner P. The Extent of Continental Material in Oceans: C-Blocks and the Laxmi Basin Example // *Geoph. J. Inter.* 2020. DOI: 10.1093/gji/ggaa215
12. Grantz A., Hart P., Childers V. Geology and tectonic development of the Amerasia and Canada Basins, Arctic Ocean / Spencer A.M., Embry A.F., Gautier D.L., Stoupakova A.V. & Sørensen K. (eds.) // *Arctic Petroleum Geology*. Geol. Soc. London: Mem., 2011. Vol. 35. P. 771–799. URL: <http://doi.org/10.1144/M35.50>.
13. Guan H. Les marges passives volcaniques: origine, structure et développement. *Sciences de la Terre*. Université de Bretagne occidentale — Brest, 2018. Français. NNT: 2018BRES0068
14. Guan H., Geoffroy L., Gernigon L., et al. Magmatic ocean-continent transitions // *Marine Petrol. Geol.* 2019. Vol. 104. P. 438–450. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.04.003>
15. Harkin C., Kusznir N., Roberts A., et al. Origin, composition and relative timing of seaward dipping reflectors on the pelotas rifted margin // *Mar. Petrol. Geol.* 2020. Vol. 114. P. 104235. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104235>
16. Jackson H.R., Chian D. The Alpha-Mendelev ridge a large igneous province with continental affinities // *GFF*. 2019. DOI: 10.1080/11035897.2019.1655789
17. Jakobsson M., Mayer L.A., Bringensparr C., et al. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0 // *Sci Data*. 2020. 7. P. 176. URL: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0520-9>
18. Kashubin S.N., Petrov O.V., Artemieva I.M., et al. Crustal structure of the Mendeleev Rise and the Chukchi Plateau (Arctic Ocean) along the Russian wide-angle and multichannel seismic reflection experiment “Arctic-2012” // *J. Geodyn.* 2018. Vol. 119. P. 107–122. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.03.006>
19. Kossovaya O.L., Tolmacheva T.Yu., Petrov O.V., et al. Palaeozoic carbonates and fossils of the Mendeleev Rise (Eastern Arctic): study of sea bottom dredged material // *J. Geodyn.* 2018. Vol. 120, P. 23–44. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.05.001>
20. Lebedeva-Ivanova N., Gaina C., Minakov A., Kashubin S. ArcCRUST: Arctic Crustal Thickness From 3-D Gravity Inversion // *Geochemistry, Geophys. Geosystems*. 2019. 2018GC008098. URL: <https://doi.org/10.1029/2018GC008098>
21. McDermott C., Lonergan L., Collier J.S., et al. Characterization of seaward-dipping reflectors along the South American Atlantic margin and implications for continental breakup // *Tectonics*. 2018. Vol. 37. P. 3303–3327. URL: <https://doi.org/10.1029/2017TC004923>
22. Meyer R., Hertogen J., Pedersen R.B., et al. Interaction of mantle derived melts with crust during the emplacement of the Voring Plateau, N.E. Atlantic // *Mar. Geol.* 2009. Vol. 261, nos. 1–4. P. 3–16. URL: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.02.007>
23. Mosher D., Dickson M-L., Shimeld J., et al. Canada’s maritime frontier: the science legacy of Canada’s extended continental shelf mapping for UNCLOS // *Can. J. Earth Sci.* 2023, 00: 1–51. DOI: [dx.doi.org/10.1139/cjes-2022-0069](https://doi.org/10.1139/cjes-2022-0069)
24. Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S., et al. Arctic Ocean Mega Project: Paper 1 — Data collection // *Earth-Sci. Rev.* 2021a. Vol. 217, 103559. URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103559>.
25. Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S., et al. Arctic Ocean Mega Project: Paper 2 — Arctic stratigraphy and regional tectonic structure // *Earth-Sci. Rev.* 2021b. Vol. 217. P. 103581. URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103581>
26. Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S., et al. Arctic Ocean Mega Project: Paper 3 — Mesozoic to Cenozoic geological evolution // *Earth-Sci. Rev.* 2021c. Vol. 217. P. 103034. URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103034>
27. Nikishin A.M., Rodina E.A., Startseva K.F., et al. Alpha-Mendelev Rise, Arctic Ocean: A double volcanic passive margin // *Gondwana Res.* 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2022.10.010>
28. Oakey G.N., Saltus R.W. Geophysical analysis of the Alpha-Mendelev ridge complex: Characterization of the High Arctic Large Igneous Province // *Tectonophysics*. 2016. Vol. 691. P. 65–84. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.08.005>
29. Petrov O.V., Smelror M. (Eds.). *Tectonostratigraphic Atlas of the Arctic (eastern Russia and adjacent areas)*. St. Petersburg: VSEGEI Press, 2019.
30. Petrov O.V., Smelror M. (Eds.). *Tectonics of the Arctic* // Springer Geology. 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-46862-0>
31. Piskarev A., Poselov V., Kaminsky V. (Eds.). *Geologic Structures of the Arctic Basin* // Springer International Publishing. Cham. 2019. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77742-9>
32. Planke S., Eldholm O. Seismic response and construction of seaward dipping wedges of flood basalts: Voring volcanic margin // *J. Geophys.* 1994. Vol. 99. P. 9263–9278. URL: <https://doi.org/10.1029/94JB00468>
33. Planke S., Symonds P. A., Alvestad E., et al. Seismic volcanostratigraphy of large-volume basaltic extrusive complexes on rifted margins // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. P. 19335–19351. DOI: 10.1029/1999JB900005
34. Rodina E.A., Nikishin A.M., Startseva K.F., Posamentier H.W. Cretaceous volcanism and intrusive magmatism features in the Mendeleev Rise region (Arctic Ocean) According to Seismic Data // *Moscow University Geology Bulletin*. 2022. Vol. 77, No. 5. P. 447–465. DOI: 10.3103/S0145875222050131
35. Skaarup N., Jackson H.R., Oakey G. Margin segmentation of Baffin Bay/Davis Strait, eastern Canada based on seismic reflection and potential field data // *Mar. Petrol. Geol.* 2006. Vol. 23 (1). P. 127–144. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2005.06.002>
36. Skolotnev S., Aleksandrova G., Isakova T., et al. Fossils from seabed bedrocks: Implications for the nature of the acoustic basement of the Mendeleev Rise (Arctic Ocean) // *Mar. Geol.* 2019. Vol. 407. P. 148–163. URL: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.11.002>
37. Skolotnev S.G., Fedonkin M.A., Korniychuk A.V. New data on the geological structure of the southwestern Mendeleev Rise, Arctic Ocean // *Dokl. Earth Sci.* 2017. Vol. 476. P. 1001–1006. URL: <https://doi.org/10.1134/S1028334X17090173>
38. Skolotnev S.G., Freiman S.I., Khisamutdinova A.I., et al. Sedimentary Rocks in the Basement of the Alpha-Mendelev Rise, Arctic Ocean // *Lithology and Mineral Resources*. 2022. Vol. 57, No. 2. P. 121–142. DOI: 10.1134/S0024490222020079

Статья поступила в редакцию 28.08.2023,
одобрена после рецензирования 02.10.2023,
принята к публикации 22.01.2024