

Посвящается 270-летию Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

УДК 550.8.01. 550.85

ФОРМЫ ПРОЯВЛЕНИЯ МЕЛОВОГО ВУЛКАНИЗМА И ИНТРУЗИВНОГО МАГМАТИЗМА В РАЙОНЕ ПОДНЯТИЯ МЕНДЕЛЕЕВА (АРКТИЧЕСКИЙ ОКЕАН) ПО ДАННЫМ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Елизавета Андреевна Родина^{1✉}, Анатолий Михайлович Никишин²,
Ксения Федоровна Старцева³, Генри Уильям Посаментьер⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; rodina_liza@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; amnikishin@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kfstartseva@gmail.com

⁴ Консультант, 25 Топсайд Роу Драйв, Те-Вудлендс, Техас 77380, США; hposamen1@gmail.com

Аннотация. Работа основана на интерпретации сейсмических профилей МОВ ОГТ для Амеразийского бассейна. По результатам интерпретации сейсмических данных практически повсеместно в пределах поднятия Альфа-Менделеева и сопряженных с ним бассейнов в полуграбенах и впадинах выделен синрифтовый сейсмостратиграфический комплекс. На сейсмических профилях в составе синрифтового комплекса обнаружены различные проявления магматизма: платобазальты; силлы и дайки; рефлекторы, похожие на SDRs (Seaward Dipping Reflectors Sequences или последовательности рефлекторов, наклонных в сторону моря), и вулканы. Региональное растяжение и синхронный широко распространенный магматизм, вероятно, связаны с образованием в апт-альбское время Большой магматической провинции Высокой Арктики (HALIP, High Arctic Large Igneous Province). С учетом данных о изотопном возрасте магматических пород для поднятия Менделеева сделано предположение, что кровля синрифтового сейсмостратиграфического комплекса имеет возраст приблизительно 100 млн лет, подошва — 125 млн. Повсеместность распространения синрифтового комплекса и его единый сейсмостратиграфический уровень позволяют предположить, что поднятие Альфа-Менделеева и сопряженные бассейны начали формирование синхронно в апте-альбе. Вдоль поднятия Альфа-Менделеева можно провести осевую линию. Западнее осевой линии высокоамплитудные рефлекторы, похожие на SDRs, падают в сторону бассейна Подводников, восточнее — в сторону бассейнов Толля, Менделеева, Наутилуса и Стефанссона. Рефлекторы сходятся в центральных частях бассейнов. Здесь проходят центральные оси растяжения. Поднятие Альфа-Менделеева — двусторонняя вулканическая пассивная континентальная окраина. Бассейны Подводников, Толля, Менделеева, Наутилус и Стефанссона — рифтовые бассейны с утоненной континентальной корой в основании. Их развитие было прервано до начала спрединга и образования океанической коры.

Ключевые слова: сейсмостратиграфия, Арктический океан, Амеразийский бассейн, поднятие Менделеева, бассейн Подводников, бассейн Толля, поднятие Де-Лонга, SDRs, подводные вулканы, платобазальты, HALIP

Для цитирования: Родина Е.А., Никишин А.М., Старцева К.Ф., Посаментьер Г.В. Формы проявления мелового вулканизма и интрузивного магматизма в районе поднятия Менделеева (Арктический океан) по данным сейсморазведки // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 4. С. 3–20.

CRETACEOUS VOLCANISM AND INTRUSIVE MAGMATISM FEATURES IN THE MENDELEEV RISE REGION (ARCTIC OCEAN) ACCORDING TO SEISMIC DATA

Elizaveta A. Rodina^{1✉}, Anatoly M. Nikishin², Ksenia F. Startseva³,
Henry W. Posamentier⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; rodina_liza@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; amnikishin@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kfstartseva@gmail.com

⁴ Consultant, 25 Topside Row Drive, the Woodlands, TX 77380, USA; hposamen1@gmail.com

Abstract. The current paper is based primarily on the interpretation of 2D seismic lines for the Amerasian Basin. A synrift complex has been identified in half-grabens almost everywhere within the Alpha-Mendelev Rise and conjugate basins according to the results of seismic data interpretation. Various magmatism features within the synrift complex have been identified on seismic profiles: plateau basalts; sills and dikes; reflections similar to SDRs (Seaward Dipping Reflectors Sequences) and volcanoes. Regional extension and synchronous widespread magmatism are probably associated with the formation of the High Arctic Large Igneous Province (HALIP) in the Aptian-Albian. Considering the data on the isotope ages of igneous rocks for the Mendelev Rise, it is assumed that the top of the synrift complex has an approximate age of 100 Ma and the bottom has an approximate age of 125 Ma. The Alpha-Mendelev Rise was formed simultaneously with conjugate basins in the Aptian-Albian. An axial line can be drawn along the

Alpha-Mendelev Rise. To the west of the axial line, reflections similar to SDRs dip towards the Podvodnikov basin. To the east of the axial line, reflections dip towards the Toll, Mendelev, Nautilus and Stefansson basins. The reflections converge in the central parts of the basins. The Alpha Mendelev Rise is a double-sided volcanic passive continental margin. The Podvodnikov, Toll, Mendelev, Nautilus, and Stefansson basins are rift basins with thinned continental crust at the base. Their development was interrupted before the start of spreading and the oceanic crust formation.

Key words: seismostratigraphy, Arctic Ocean, Amerasian Basin, Mendelev Rise, Podvodnikov Basin, Toll Basin, De Long High, SDRs, volcanoes, plateau basalts, HALIP

For citation: Rodina E.A., Nikishin A. M., Startseva K.F., Posamentier H. W. Cretaceous volcanism and intrusive magmatism features in the Mendelev Rise region (Arctic Ocean) according to seismic data. *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 4: 3–20. (In Russ.).

Введение. Арктический океан состоит из Евразийского и Амеразийского глубоководных бассейнов и прилегающего к ним континентального шельфа. Глубоководные Евразийский и Амеразийский бассейны разделяет хребт Ломоносова. Район исследований расположен в пределах Амеразийского глубоководного бассейна и включает в себя поднятие Альфа-Менделеева и сопряженные с ним глубоководные бассейны Подводников, Макарова на западе, а также Толля, Менделеева, Наутилус, Стефанссона на востоке (рис. 1). Восточная граница района исследования ограничена Чукотским Бордерлендом. На юге находятся Северо-Чукотский осадочный бассейн и поднятие Де-Лонга.

Район поднятия Альфа-Менделеева изучен с помощью региональной 2D сейсморазведки. Основные результаты интерпретации сейсмических профилей

представлены в работах [Weigelt et al., 2014; Evangelatos et al., 2016; Ilhan et al., 2018; Shimeld et al., 2011; Nikishin et al., 2021b, c; Kashubin et al., 2018; Poselov et al., 2017; Piskarev et al., 2019; Поселов и др., 2019; Дараган-Суцова и др., 2014, 2019].

В районе поднятия Альфа-Менделеева неоднократно проводился пробоотбор. Представление о составе пород и строении склонов поднятия Альфа-Менделеева получено в ходе российских экспедиций Арктика-2012, Арктика-2014 и Арктика-2016. Результаты этих экспедиций опубликованы в работах [Skolotnev et al., 2019; Сколотнев и др., 2022; Морозов и др., 2013; Гусев и др., 2014; Petrov et al., 2016; Nikishin et al., 2021a, b]. Основные результаты иностранных экспедиций с пробоотбором опубликованы в работах [Mukasa et al., 2020; Jokat et al., 2013; Brumley, 2014; Van Wagoner et al., 1986; Williamson et al., 2019].

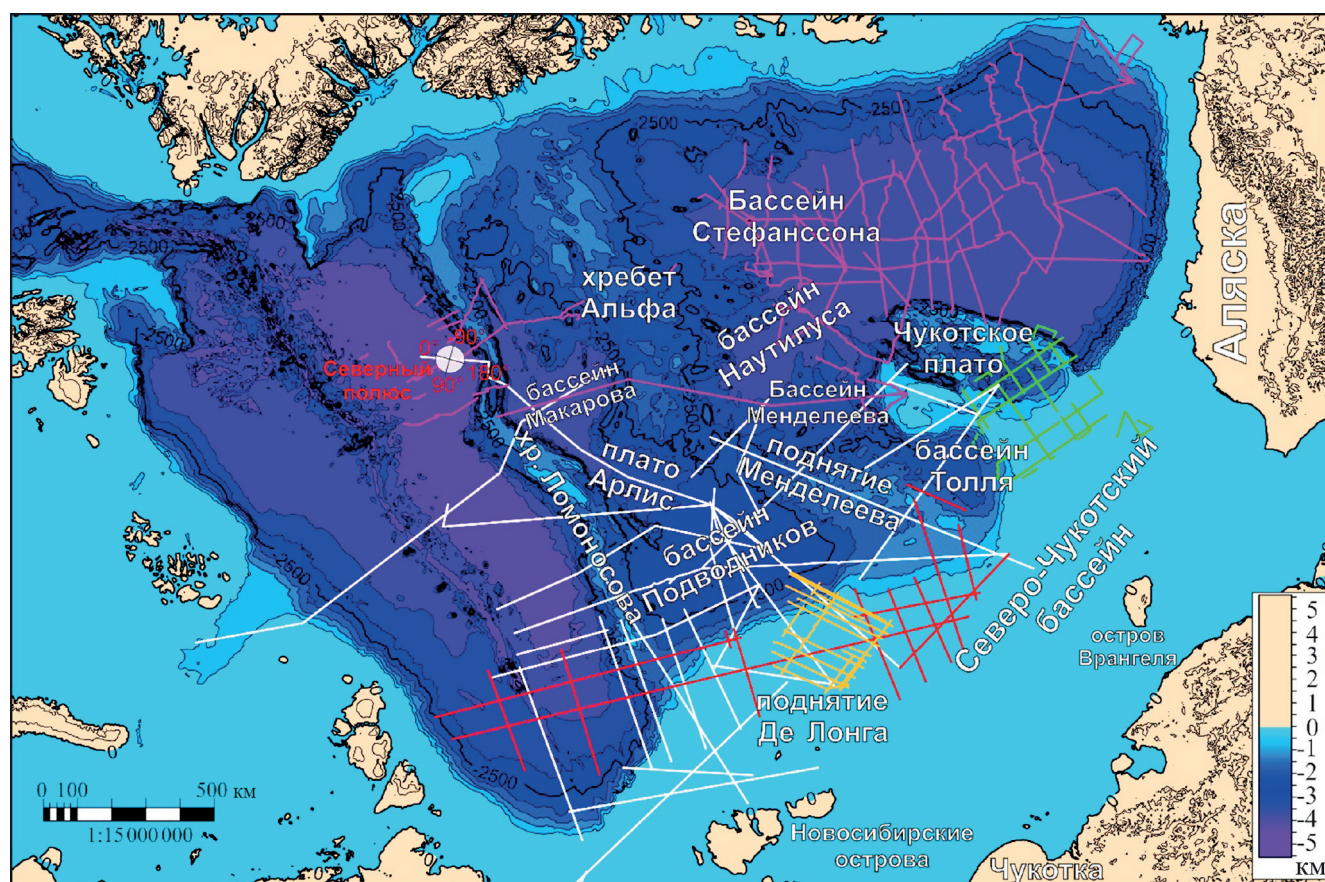


Рис. 1. Карта топографии и батиметрии Арктического региона [Jakobsson et al., 2012, 2020] с локацией сейсмических профилей. Белые линии соответствуют профилям из экспедиций Арктика-2011, 2012 и 2014; красные линии — профилям из экспедиции Арктика-2020; оранжевые линии — соответствуют профилям из экспедиции МАГЭ-2016, зеленые — сейсмическим профилям, опубликованным в [Ilhan, Coakley, 2018], розовые — сейсмическим профилям, представленным в [Shimeld et al., 2021]

Основные исследования аномалий магнитного и гравитационных полей описаны в работах [Piskarev et al., 2019; Gaina et al., 2011; Oakey, Saltus, 2016; Dossing et al., 2013; Chernykh et al., 2018; Saltus et al., 2011]. По геофизическим данным [Coakley et al., 2016; Mukasa et al., 2020; Estrada et al., 2016; Jackson and Chain, 2019] в пределах изучаемой территории выделяется событие интенсивного магматизма, связанное с образованием HALIP (High Arctic Large Igneous Province, или Большой магматической провинции Высокой Арктики), происходившее приблизительно 125–80 Ма.

Мы обнаружили различные проявления магматизма на сейсмических профилях, это вулканические постройки, платобазальты, дайки и силлы, а главное — вулканические комплексы, характеризующиеся пологонаклонными сейсмическими отражениями, которые в международной литературе получили название SDRs (Seaward Dipping Reflectors Sequences, последовательности рефлекторов, наклонных в сторону моря) (рис. 2–4). Эти проявления магматизма приурочены к синрифтовому сейсмостратиграфическому комплексу, который прослеживается почти повсеместно, и в глубоководных бассейнах, и в полуграбенах на поднятиях. В статье подробно описаны все формы проявления магматизма, строение синрифтового сейсмостратиграфического комплекса в глубоководных бассейнах и на поднятии Альфа-Менделеева, а также предложена общая концепция геологического строения и истории формирования поднятия Альфа-Менделеева и сопряженных бассейнов в меловое время.

Геологическое строение района исследования.

Основное внимание было сосредоточено на поднятии Альфа-Менделеева и сопряженных бассейнах. Поднятие Альфа-Менделеева протягивается в субмеридиональном направлении от Северо-Чукотского осадочного бассейна (район о-ва Врангеля) к Канадскому архипелагу. Часть поднятия, расположенная ближе к Северо-Чукотскому бассейну, называется поднятием Менделеева, часть поднятия, расположенная ближе к Канадскому архипелагу, — хребет Альфа. Поднятие представляет собой область с мощностью коры 20–30 км [Kashubin et al., 2018; Evangelatos et al., 2017; Glebovsky et al., 2013; Gaina et al., 2011; Jokat, Ickrath, 2015; Lebedeva-Ivanova et al., 2019; Petrov et al., 2016]. Существует несколько версий происхождения поднятия. Согласно одной версии, поднятие представляет собой меловое океаническое плато с утолщенной базальтовой корой, образовавшееся над мантийным плюмом, например [Dove et al., 2010]. Согласно другой версии, — это может быть блок континентальной коры, утоненной в результате рифтинга, во время которого проявился базальтовый магматизм, например, [Nikishin et al., 2021; Petrov et al., 2016; Kashubin et al., 2018; Lebedeva-Ivanova et al., 2019; Jackson, Chain, 2019]. Существуют и альтернативные точки зрения. Например в работе [Weber, 1990] предположено, что поднятие

Менделеева имеет континентальную природу, в то время как хребет Альфа образовался, как океаническое плато над мантийным плюмом.

Бассейны Подводников и Макарова расположены между поднятием Альфа-Менделеева и хр. Ломоносова. Бассейны Толля, Менделеева и Наутилус расположены между поднятием Альфа-Менделеева и Чукотским Бордерлендом. Как и в случае с поднятием Альфа-Менделеева, существует несколько версий происхождения этих бассейнов. Часть авторов считают, что эти бассейны имеют в своем основании океаническую кору, например [Grantz et al., 2011; Van Wagoner, 1986]. Другие авторы полагают, что эти бассейны образовались на растянутой в результате рифтинга континентальной коре, например [Jokat, Ickrath, 2015; Kashubin et al., 2018; Nikishin et al., 2021b, c]. Бассейн Стефанссона расположен между поднятием Альфа и Канадским архипелагом, он малоизучен.

Чукотский Бордерленд включает в себя Чукотское плато, хребет и котловину Нортвинд. Чукотское плато — приподнятый континентальный блок [Kashubin et al., 2018; Ilhan, Coakley, 2018], расположенный восточнее поднятия Менделеева. В пределах поднятия присутствует серия меловых полуграбенов приблизительно субмеридионального простирания.

Северо-Чукотский осадочный бассейн расположен на южном окончании поднятия Менделеева. В его основании находится растянутая континентальная кора мощностью 10–20 км [Kashubin et al., 2018]. Мощность осадочного чехла достигает 20 км [Nikishin et al., 2021b; Никишин и др., 2017]. Северо-Чукотский бассейн на западе плавно переходит в Восточно-Сибирский шельфовый бассейн. Так же, как и в Лаптевском и Чукотском шельфовых бассейнах, здесь развиты системы меловых и кайнозойских рифтов [Никишин и др., 2017].

Поднятие Де-Лонга относится к системе Новосибирских о-вов и включает в себя о-ва Беннетта, Генриетты, Жаннетты, Вилькицкого и Жохова. Поднятие расположено между морями Лаптевых и Восточно-Сибирским. Границы поднятия хорошо проявлены на картах магнитных и гравитационных аномалий [Piskarev et al., 2019; Gaina et al., 2011; Oakey, Saltus, 2016; Dossing et al., 2013; Chernykh et al., 2018; Saltus et al., 2011]. Поднятие осложнено серией полуграбенов субмеридионального простирания. На о-ве Беннетта были описаны и датированы базальты. Образцы базальтов имеют возраст в пределах 105–130 млн лет [Drachev et al., 2006; Косьюко и др., 2013] и схожи с базальтами, отобранными на поднятии Менделеева [Skolotnev et al., 2019]. Поднятие Де-Лонга входит в состав HALIP [Drachev et al., 2006]. В состав HALIP также включают и другие области магматизма — о-ва Земли Франца Иосифа, Шпицберген и Элсмир.

Данные опробования горных пород на склонах поднятия Альфа-Менделеева. В результате экспедиции Арктика-2012 с горы Трукшина (в пределах

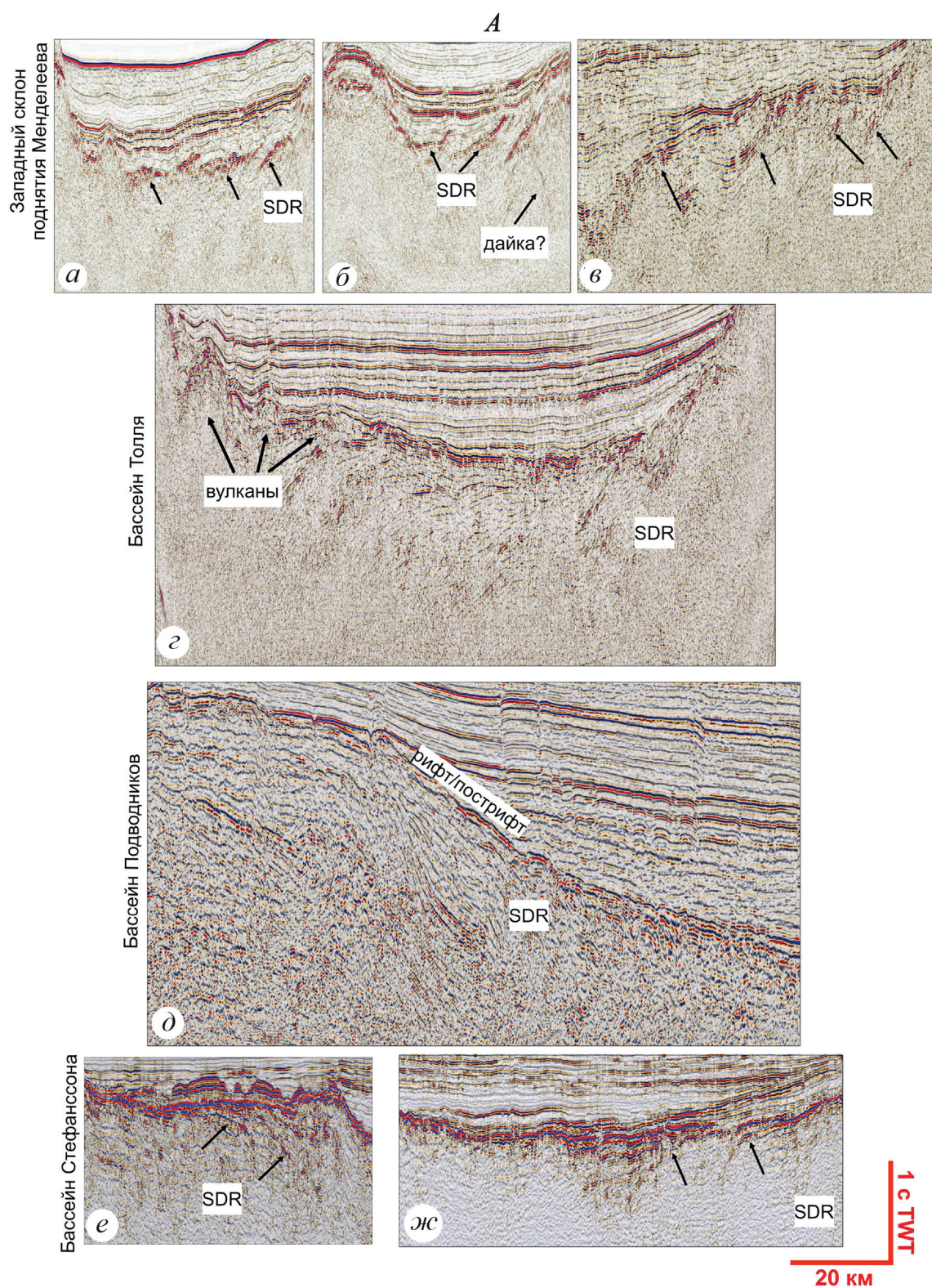
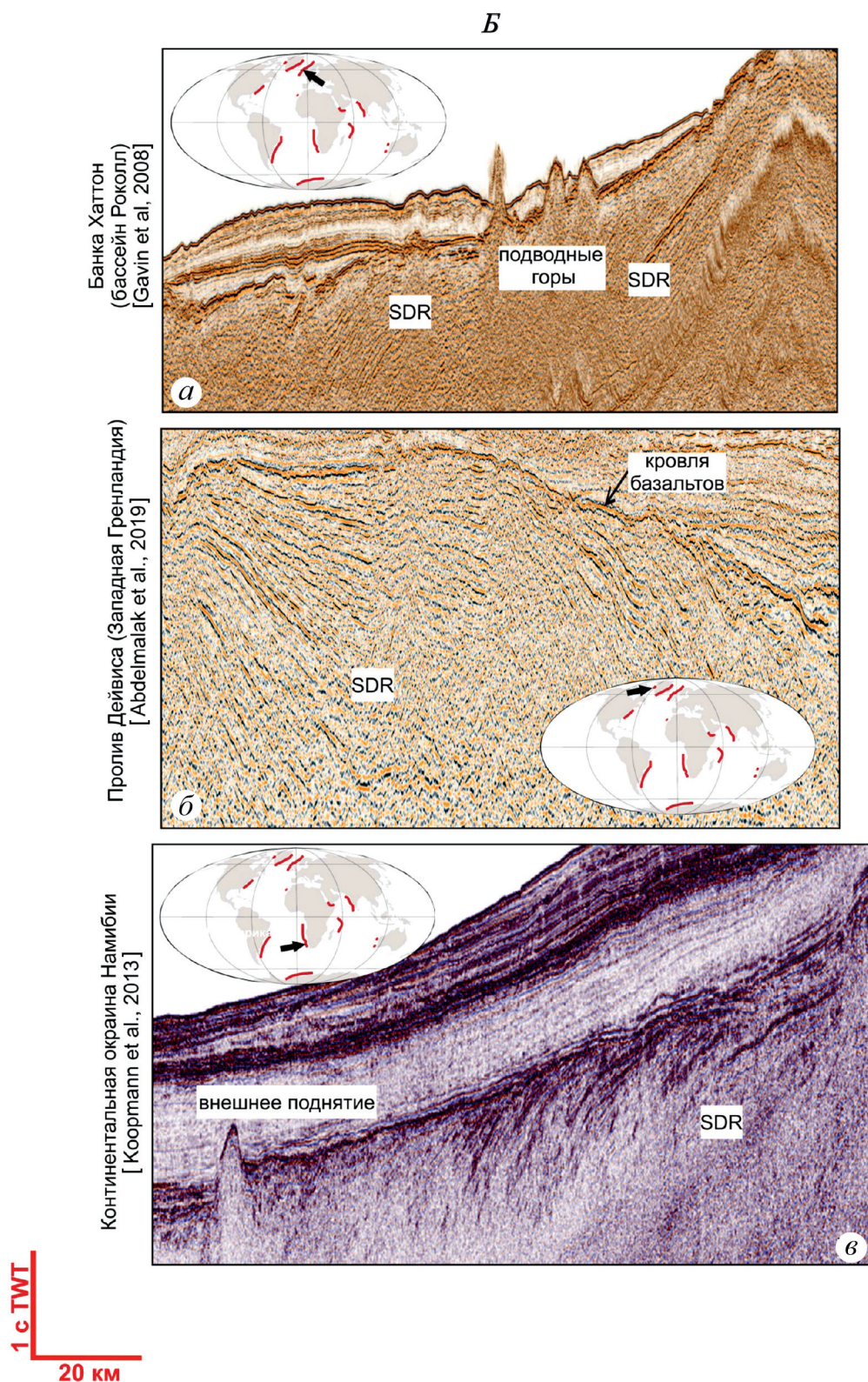


Рис. 2. Примеры рефлекторов, похожих на SDRs, в районе поднятия Альфа-Менделеева (А, Б). Фрагменты сейсмических профилей ARC12-04: I-II, ARC12-03: III-IV, ARC14-01: V, lsl-0918 из [Shimeld et al., 2021]: VI, lsl-0808a из [Shimeld et al., 2021]: VII (А); примеры известных классических внутренних и промежуточных SDRs (I-III). Локация указана черной стрелкой на карте распространения вулканических пассивных континентальных окраин в мире [Geoffroy, 2005] (Б) →



поднятия Альфа) были отобраны пробы брекчий с обломками трахибазальтов с изотопным U-Pb возрастом $127,5 \pm 2,7$ млн лет [Морозов и др., 2013; Гусев и др., 2014].

В результате федеральных российских глубоководных экспедиций Арктика-2014 и Арктика-2016 на поднятии Менделеева опробовано 3 склона и обнаружено, что они, несмотря на свою удаленность друг от друга более чем на 500 км, имеют схожее строение

геологического разреза [Skolotnev et al., 2017, 2019; Сколотнев и др., 2022]. В основании разреза присутствуют шельфовые карбонатные и терригенные породы с ордовикским–девонским возрастом фауны. Эти отложения пронизаны раннемеловыми интрузиями. На сейсмических разрезах эта часть разреза входит в состав акустического фундамента. В верхних частях склонов отмечены выходы раннемеловых песчаников, туфов и лав. Меловые песчаники

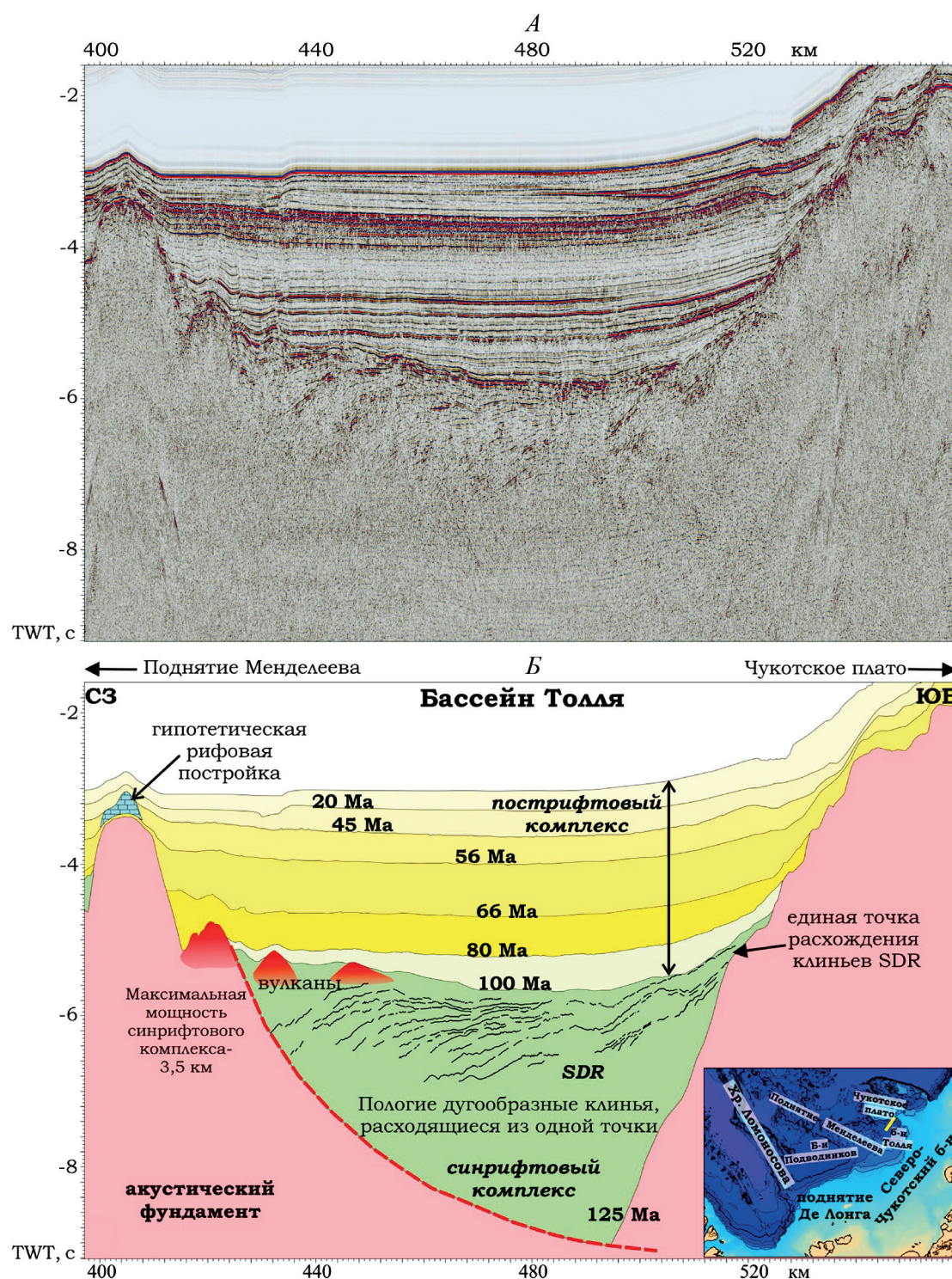


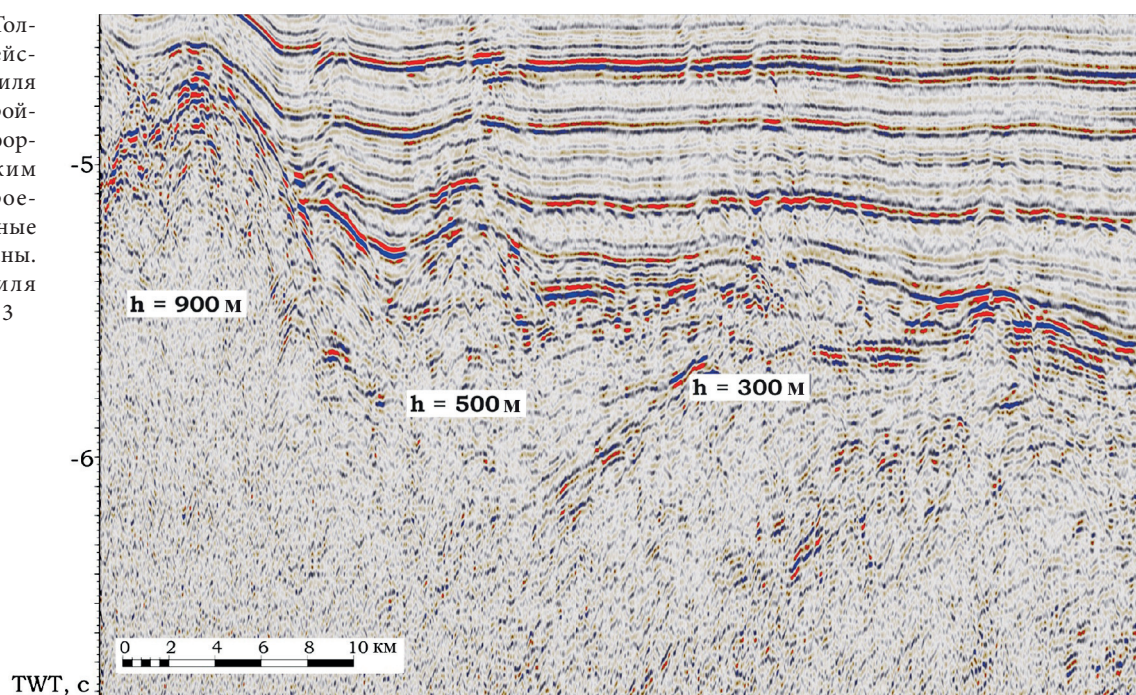
Рис. 3. Бассейн Толля: А — фрагмент сейсмического профиля ARC12-03; Б — его интерпретация. Локация профиля указана на врезке. В составе синрифтового комплекса выделяются рефлекторы, возможно, внутренние SDRs

формировались в мелководно-морских условиях 125–113 млн лет назад (л.н.) [Skolotnev et al., 2019; Сколотнев и др., 2022]. Возраст базальтовых лав и интрузий по результатам Ar/Ar и U/Pb датирования находится в интервале 100–124 млн лет (устное сообщение С.Г. Сколотнева [Nikishin et al., 2021a]). Лавам свойственна пористость. Обнаружена вулканическая бомба с Ar/Ar возрастом $117,3 \pm 2,0$ млн лет (устное сообщение С.Г. Сколотнева). Эти находки свидетельствуют в пользу апт-альбского вулканизма в субаэральных (наземных) и мелководных условиях (устное сообщение С.Г. Сколотнева).

В работе [Mukasa et al., 2020] описаны базальты, отобранные на северном склоне Чукотского Бордерленда и на поднятии в бассейне Наутилус. Получены три группы Ar/Ar значений возраста: 118–112, 105–100 и 90–70 млн лет.

В работе [Brumley, 2014] описаны образцы, которые были отобраны на восточном склоне поднятия Альфа, прилегающем к бассейну Наутилус. Образцы представлены вулканогенно-обломочными породами, образовавшимися в субаэральных (наземных) условиях. Вулканогенная составляющая имеет базальтовый состав.

Рис. 4. Бассейн Толля. Фрагмент сейсмического профиля ARC12-03. Постройки треугольной формы с хаотическим внутренним строением — возможные подводные вулканы. Локация профиля указана на рис. 3



В работе [Van Wagoner, 1986] описано 20 образцов, отобранных из полуграбенов поднятия Альфа. Породы почти целиком состоят из обломков базальтов с небольшим содержанием матрикса.

В работе [Williamson et al., 2019] описаны результаты экспедиции 2016 г., в результате которой со склонов поднятия Альфа было отобрано 100 кг вулканических пород, представленных туфами, которые содержат обломки стекла и базальтов. Получен Ar/Ar возраст $90,40 \pm 0,26$ млн лет. Текстура вулканических пород свидетельствует о субаэральных (наземных) условиях извержения.

Рефлекторы, погружающиеся в сторону моря (SDRs). Термин SDRs относится к рефлекторам, выделяющимся на сейсмических данных. Впервые SDRs обнаружены в конце 1970-х гг., их широко изучали в 1980-х гг. с помощью морской сейсморазведки и в рамках программы океанического бурения (Ocean Drilling Program) [Eldholm et al., 1987; Hinz, 1981].

SDRs представляют собой высокоамплитудные, плоско-параллельные или изогнутые рефлекторы, образующие веерообразные расходящиеся клинья (рис. 2, А, Б). Комплексы с SDRs обычно имеют высокоамплитудную кровлю, которой присущ прилегающий характер границ. Подошва комплекса SDRs на сейсмических данных обычно не определима. Есть предположения, что в основании комплекса SDRs находится детачмент или серия ограничивающих разломов [Chauvet et al., 2020, 2021; Geoffroy, 2005; Geoffroy et al., 2020; Planke et al., 2000]. Рефлекторы полого наклонены и омолаживаются в сторону «океана» (т. е. в сторону оси растяжения). Они могут простираться в стороны на сотни километров [McDermott et al., 2018], а их мощность варьирует от 3–5 до 10, редко до 20 км [Planke et al., 2000]. Значения сейсмической скорости в клиньях SDRs обычно составляют от 3–4 км/с сверху разреза до 6,5 км/с

внизу [Harkina et al., 2020]. Существует немного доступных скважинных данных для комплексов с 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 Диско-Нунавик (Западная Гренландия) [Abdelmalak et al., 2019; Geoffroy et al., 2005] и Кэп-Дайер у Земли Баффина (Канада) [Skaarup et al., 2006]. По результатам анализа керн из скважин на шельфе и данных береговых исследований следует, что SDRs представлены субаэральными базальтовыми потоками. Прослои базальтов переслаиваются с небольшим количеством вулканокластического и/или осадочного материала. Мощность отдельных базальтовых прослоев может достигать 5–10 м [Abdelmalak et al., 2016].

SDRs — атрибут вулканических пассивных континентальных окраин. Основные классические примеры таких окраин — сопряженные континентальные окраины Восточной Гренландии [Elliott et al., 2008] и Норвегии (рис. 2, Б-I) [Abdelmalak et al., 2016], сопряженные континентальные окраины Западной Гренландии [Abdelmalak et al., 2019] и Канады (рис. 2, Б-II) [Skaarup et al., 2006], сопряженные континентальные окраины Южной Африки (Намибия) (рис. 2, Б-III) [Koopmann et al., 2013] и Южной Америки (Уругвай, Бразилия) [Chauvet et al., 2021; Sapin et al., 2021; Conti et al., 2017], континентальная окраина Индии [Nemcok et al., 2016; Geoffroy et al., 2020].

В строении вулканических пассивных континентальных окраин существует ряд закономерностей. Комплексы SDRs простираются вдоль вулканических окраин на сотни и тысячи километров и уходят в глубь океана на десятки и сотни километров [McDermott и др., 2018]. В Западной Гренландии в

обнажениях базальтов SDRs описаны ортогонально наклоненные к базальтам дайки [Abdelmalak et al., 2019; Geoffroy et al., 2005]. Дайки, вероятно, служили подводными каналами для базальтов SDRs [Geoffroy, 2005, 2015]. На континентах часто присутствуют одновозрастные или близкие по возрасту трапповые провинции. Например, Деканские траппы в Индии [Nemcok et al., 2016], трапповое плато Парана в Бразилии, плато Этендека в Намибии [Chauvet et al., 2021], траппы формации Малигат в Западной Гренландии [Larsen et al., 2015] или траппы в районе Кангерлуссуак в Восточной Гренландии [Geoffroy, 2005]. Таким образом, в строении вулканической пассивной континентальной окраины можно выделить следующие элементы: комплексы базальтов SDRs, подводные дайки, трапповые плато.

Существует ряд различных классификаций SDRs, например [Geoffroy, 2005, 2015, 2020; Harkina, 2020; Planke et al., 2000; McDermott et al., 2018]. Общее в них — разделение SDRs на внутренние (inner) и внешние (outer). Иногда выделяется промежуточный (intermediate) тип [Chauvet et al., 2021]. Классификации основаны на ряде различий в морфологии и в механизме образования разных типов.

Внутренние SDRs образуют клинья субпараллельных расходящихся рефлекторов. Клинья утолщаются в сторону океана. Их мощность в среднем составляет от 2 до 6 км, длина 10–80 км [Planke et al., 2000]. Клинья внутренних SDRs заполняют серию полуграбенов и ограничены разломами, падающими навстречу рефлекторам, т.е. в сторону берега [Chauvet et al., 2020, 2021].

Далее в сторону моря некоторые авторы выделяют промежуточные SDRs. Их клинья более изогнутые, чем клинья внутренних SDRs, и более мощные (от 6 до 20 км), и более протяженные (50–200 км) [Planke et al., 2000]. Между промежуточными и внешними SDRs иногда могут присутствовать внешние поднятия (outer high), возможно, вулканической природы (рис. 2, Б-III) [Chauvet et al., 2021, Planke et al., 2000; Calves et al., 2011].

Наиболее отдаленные от берега внешние SDRs образуют сплошной непрерывный клин рефлекторов. Клинья внешних SDRs имеют толщину 5–8 км и могут быть достаточно протяженными — 50–200 км. Наклонные и изогнутые рефлекторы по мере отдаления от берега выполаживаются и сменяются параллельно залегающими потоками лав [Planke et al., 2000, Chauvet et al., 2021].

Механизм образования SDRs составляет предмет дискуссий. Существует несколько различных моделей образования SDRs [Paton 2017; Planke, 2000; White et al., 2009; Chauvet et al., 2020, 2021; Geoffroy, 2005]. Согласно наиболее распространенным моделям, базальты SDRs изливаются в субаэральных условиях в процессе растяжения и изначально формируют базальтовые плато (или landward flows) [Planke et al., 2000]. Затем, при продолжающемся растяжении континентальной коры формируются

полуграбены. Их образование приводит к провоцированию синхронно изливающихся базальтовых потоков. Общепринятым считается, что внутренние SDRs образуются на ранней фазе континентального рифтинга в субаэральных или мелководных условиях до образования центра спрединга. Подстилающая внутренние SDRs кора утонена, пронизана интрузиями и имеет континентальную природу [Chauvet et al., 2021]. Образование внешних SDRs более дискуссионно. На сегодняшний день существуют две наиболее популярные версии. Некоторые авторы полагают, что их образование происходило в глубоководных условиях и связано со спредингом и образованием новой океанической коры, например [Franke et al., 2010, Paton et al., 2017]. Другие [Chauvet et al., 2020, 2021; Geoffroy, 2005] полагают, что внешние SDRs образуются на более поздних стадиях континентального рифтинга.

Общепринято, что базальты SDRs формируются в результате интенсивной вулканической активности во время рифтинга, перед и синхронно с распадом континента. Обычно считается, что базальты связаны с образованием крупных магматических провинций (LIP) [Sapin et al., 2021; Chauvet et al., 2021].

Материалы и методы исследований. Сейсмические данные. Основная часть работы основана на интерпретации сейсмических профилей МОВ ОГТ. В работе использованы сейсмические профили (рис. 1), полученные в результате российских экспедиций Арктика-2011, Арктика-2012, Арктика-2014, Арктика-2020, и сейсмические профили экспедиции МАГЭ-2016. Также использованы открытые сейсмические данные для Канадского бассейна, опубликованные в [Shimeld et al., 2021], и данные для района Чукотского Бордерленда, опубликованные в [Ilhan, Coakley, 2018].

Данные о гравитационных и магнитных аномалиях. В работе использованы опубликованные международные данные о гравитационных и магнитных аномалиях [Gaina et al., 2011; Lebedeva-Ivanova et al., 2019; Jackson, Chain, 2019; Piskarev et al., 2019], которые указывают на крупную уникальную структуру в изучаемой области, состоящую из гравитационных и магнитных максимумов и минимумов высокой амплитуды (High Arctic Magnetic High Domain) [Gaina et al., 2011; Oakey, Saltus, 2016; Dossing et al., 2013; Chernykh et al., 2018]. Считается, что эта структура связана с базальтами HALIP [Oakey, Saltus, 2016].

Сейсмостратиграфия. Для интерпретации сейсмических данных использованы методы сейсмостратиграфии (в том числе сейсмической вулкanoстратиграфии) [Planke et al., 2000; Vail et al., 1977] и тектоностратиграфии [Watkinson et al., 1977]. Метод сейсмостратиграфии опирается на анализ сейсмических фаций, а именно на геологическую интерпретацию и картирование сейсмических фаций [Vail et al., 1977; Planke et al., 2000]. Метод тектоностратиграфии основан на выявлении сейсмостратиграфических комплексов и их сопоставлении с данными о тектоническом развитии региона

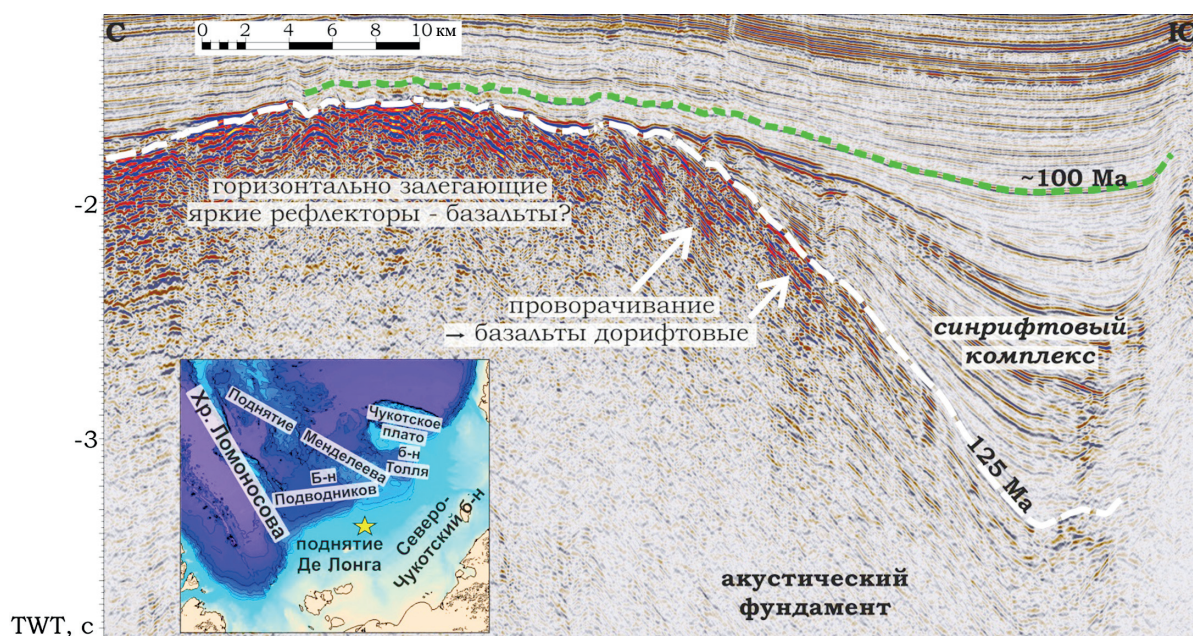


Рис. 5. Поднятие Де-Лонга. Фрагмент сейсмического профиля MAGE-2016 ESS1607. Локация профиля указана на врезке. В составе акустического фундамента выделяются высокоамплитудные субгоризонтальные рефлексоры, возможно, дорифтовые платобазальты

из литературных источников. В изучаемом районе выделяются опорные горизонты 125, 100, 80, 66, 45, 33 и 20 млн лет. Подробно выделяемые сейсмостратиграфические комплексы для изучаемого района описаны в работах [Nikishin et al., 2021b, c].

Результаты исследований и их обсуждение.

Платобазальты. На поднятии Де-Лонга на приподнятых участках в акустическом фундаменте присутствуют высокоамплитудные субгоризонтальные рефлексоры (рис. 5), вероятно, соответствующие базальтовым лавам, переслаивающимся с осадочными отложениями. Мощность пачки субгоризонтальных рефлексоров $\sim 0,3\text{--}0,6$ с TWT (two way travel time — двойное время пробега волны). Аналогичная сейсмическая фация в литературе носит название *landward flows* и представлена переслаиванием субаэральных базальтовых лав с осадочными породами [Planke et al., 2000]. Похожие лавы давно описаны для о-вов Де-Лонга [Драчев, 1989; Drachev et al., 2006; Косьюко и др., 2013]. На бортах раннемеловых полуграбенов эти рефлексоры наклонены — граница приобретает несогласный, эрозионный характер. Рефлексоры представляют собой подошву синрифтового комплекса. Вероятно, лавы, соответствующие этим рефлексорам, древнее синрифтового комплекса. На поднятии Менделеева (рис. 7) и Чукотском плато сейсмическая запись значительно менее ясная, чем на плато Де-Лонга. Здесь на выступающих блоках акустического фундамента присутствуют толщи ($\sim 0,3$ с TWT) высокоамплитудных субгоризонтальных рефлексоров со значительными следами эрозии.

Синрифтовый сейсмостратиграфический комплекс с SDRs. Для района поднятия Альфа-Менделеева и прилегающих бассейнов характерно наличие асимметричных структур растяжения — полуграбенов. В полуграбенах на сейсмических разрезах в составе синрифтового комплекса обнаружены

высокоамплитудные рефлексоры, напоминающие SDRs (рис. 2 А; 3, 6, 7, 8, 9). Кровля синрифтового комплекса с SDRs хорошо выражена и представлена высокоамплитудной границей, которой свойствен прилегающий характер границ. Подошва синрифтового комплекса с SDRs соответствует кровле акустического фундамента. Морфология клиньев SDRs различная. Принципиально можно выделить два типа SDRs. Первый тип распространен в пределах поднятий (рис. 2, А-I, II, III, рис. 7). Полуграбены с рефлексорами первого типа чередуются с выступами акустического фундамента. Мощность синрифтового комплекса с SDRs первого типа составляет $2\text{--}2,5$ с TWT, протяженность в пределах отдельных полуграбенов — $20\text{--}50$ км. Второй тип рефлексоров (рис. 3, 6, 8, 9) распространен в бортах (рис. 2, А, V, VI и VII; 6; 8, I; 9, I и II) и в центральных частях бассейнов (рис. 3, 6, 9). Они образуют серии клиньев, заполняющих полуграбены в бортах бассейнов и наращивающих друг друга к центральным частям бассейнов, где рефлексоры плавно выполаживаются (рис. 6, 9). Мощность синрифтового комплекса с SDRs второго типа составляет $2\text{--}3$ с TWT, протяженность в пределах отдельных полуграбенов — $50\text{--}100$ км. Второй тип рефлексоров больше похож на классические внутренние SDRs согласно классификациям в работах [Planke et al., 2000; Chauvet et al., 2020, 2021; Geoffroy et al., 2021].

Вулканы. В кровле синрифтового комплекса часто встречаются постройки треугольной формы с хаотическим внутренним строением, с высотой $300\text{--}900$ м и протяженностью $4\text{--}9$ км (рис. 3; 4; 7, II; 9, II). Такого типа вероятные вулканические структуры описаны в литературе [Geoffroy et al., 2020; Shimeld et al., 2011; Elliott et al., 2008; Planke et al., 2000; Chauvet et al., 2021; Calves et al., 2011]. Хорошая сохранность конусов вулканов позволяет сделать вывод об от-

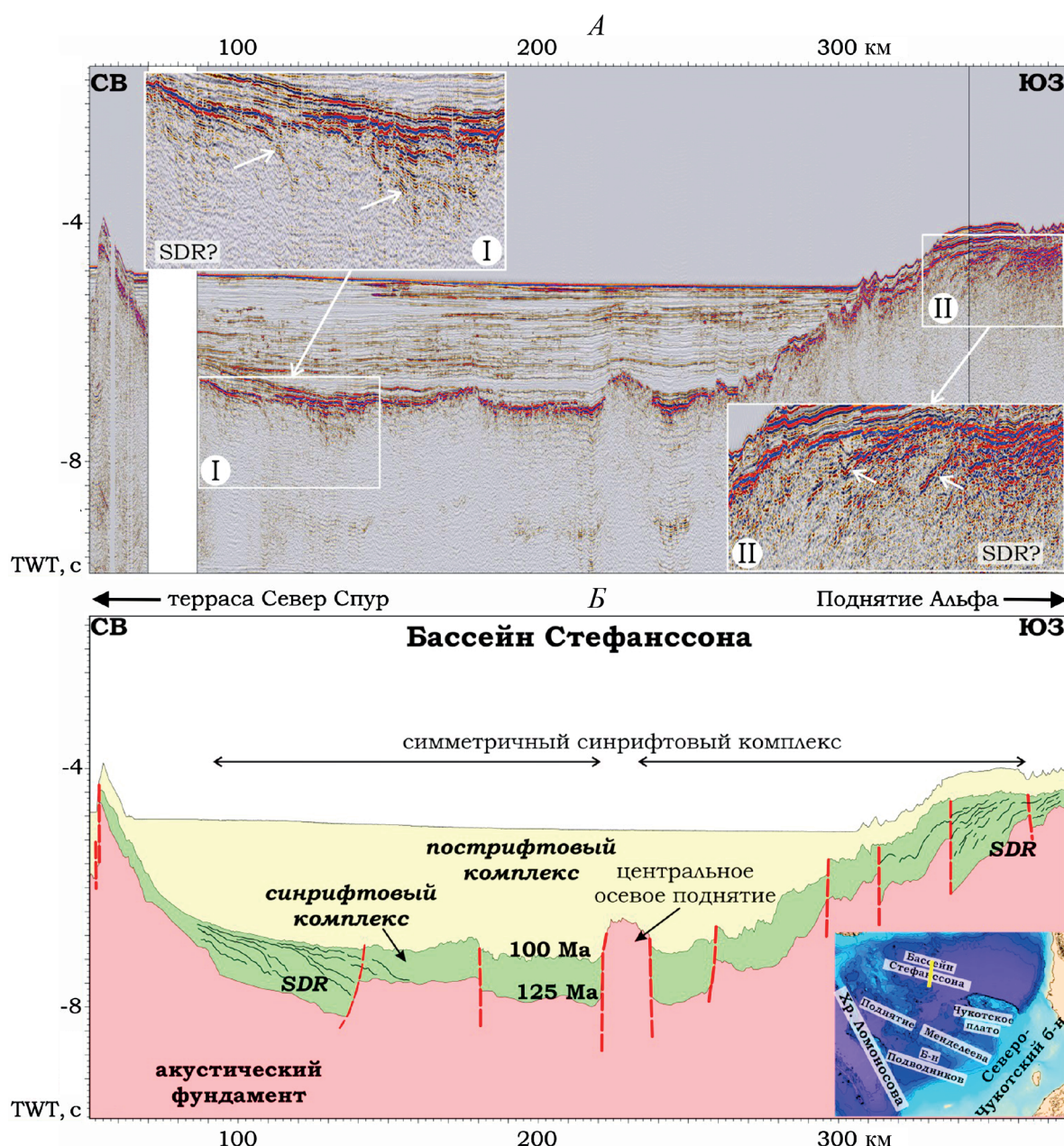


Рис. 6. Бассейн Стефанссона: А — фрагмент композитного профиля (lsl-0914, lsl-0808a, lsl1108 из [Shimeld et al., 2021]); Б — его интерпретация. Локация профиля указана на врезке. В центральной части бассейна выделяется тектонический выступ фундамента. В составе синрифтового комплекса выделяются встречные рефлекторы, похожие на внутренние SDRs. Они наклонены в центр бассейна

носителю глубокоководных условиях осадконакопления (уровень моря должен был быть выше высоты построек, иначе вершины построек были бы эродированы) во время завершения синрифтовой стадии развития изучаемого региона.

Дайки и силлы. Идентифицируются относительно высокоамплитудные секущие рефлекторы с приблизительной длиной более 5 км (рис. 7, I). Они прослеживаются из акустического фундамента и заканчиваются вблизи отдельных рефлекторов, напоминающих SDRs, вулканических построек и платобазальтов. Возможно, это дайки, выполнявшие функцию подводящих каналов. Реже встречаются согласные блюдцеобразные высокоамплитудные рефлекторы, напоминающие силлы.

Таким образом, по сейсмическим данным отчетливо можно выделить четыре формы проявления раннемелового вулканизма: 1) платобазальты, 2) базальты SDRs, 3) вулканы и 4) дайки и силлы.

Бассейн Толля расположен между поднятием Менделеева (на западе) и Чукотским плато (на востоке). В основании бассейна Толля выделяется асимметричный полуграбен протяженностью ~80 км (рис. 3) [Nikishin et al., 2014; Ilhan et al., 2018]. Полуграбен сложен синрифтовыми осадками. Мощность синрифтового комплекса ~3–4 км. В составе синрифтового комплекса прослеживаются высокоамплитудные однонаправленные, пологонаклонные, клинообразно расходящиеся рефлекторы, похожие на SDRs. Рефлекторы имеют общую точку расхож-

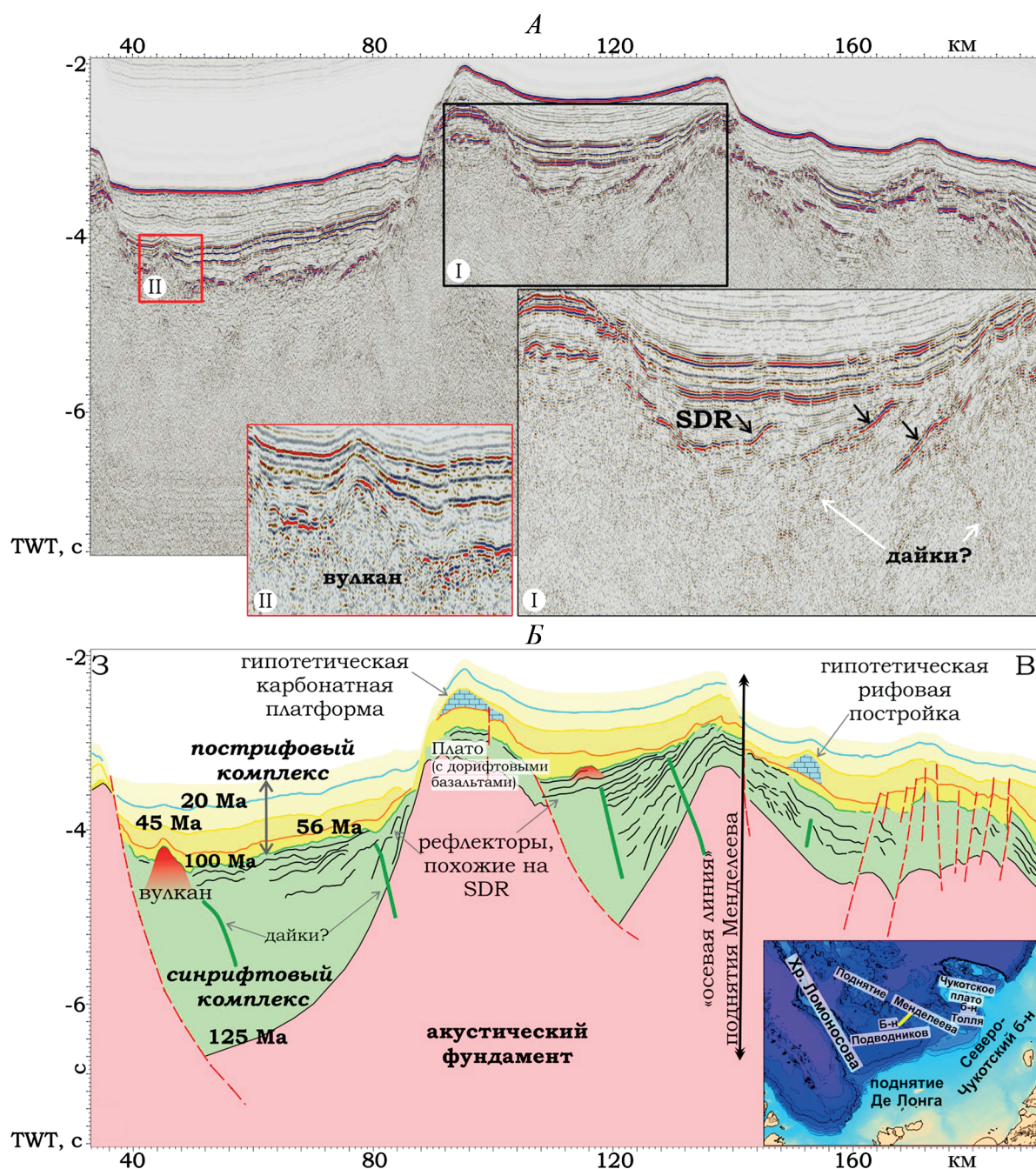


Рис. 7. Поднятие Менделеева: А — фрагмент сейсмического профиля ARC12-04; Б — его интерпретация. Локация профиля указана на врезке. В центральной части поднятия можно выделить осевую линию, у которой направление падения рефлекторов меняется на противоположное

дения и группируются в отдельные клинья. Кровля синрифтового комплекса с потенциальными SDRs представлена четкой высокоамплитудной границей и имеет несогласный характер с вышележащим пострифтовым комплексом. В кровле синрифтового комплекса присутствуют постройки треугольной формы с хаотичным внутренним строением — возможные подводные вулканы (рис. 4). Высота построек последовательно увеличивается от 300 до 900 м с востока на запад по направлению наклона клиньев возможных SDRs. Подошва синрифтового комплекса с возможными SDRs совпадает с кровлей акустического фундамента и не выражена на сейсмической записи. Возможно, здесь SDRs ограничены

серией пологих сбросов. На окончании вблизи акустического фундамента клинья потенциальных SDRs загибаются, отдельные рефлекторы прерываются и затухают. По морфологии вышеописанный тип SDRs можно отнести к классическим внутренним SDRs (рис. 2, Б, I, II).

Бассейн Менделеева расположен севернее бассейна Толля. Со склонов поднятий Менделеева и Чукотского плато в сторону бассейна наклонены встречные полуграбены (рис. 10). Протяженность отдельных полуграбенов ~2–2,5 км. В синрифтовом комплексе, заполняющем полуграбены, также обнаружены рефлекторы, напоминающие SDRs. В центральной части бассейна Менделеева нахо-

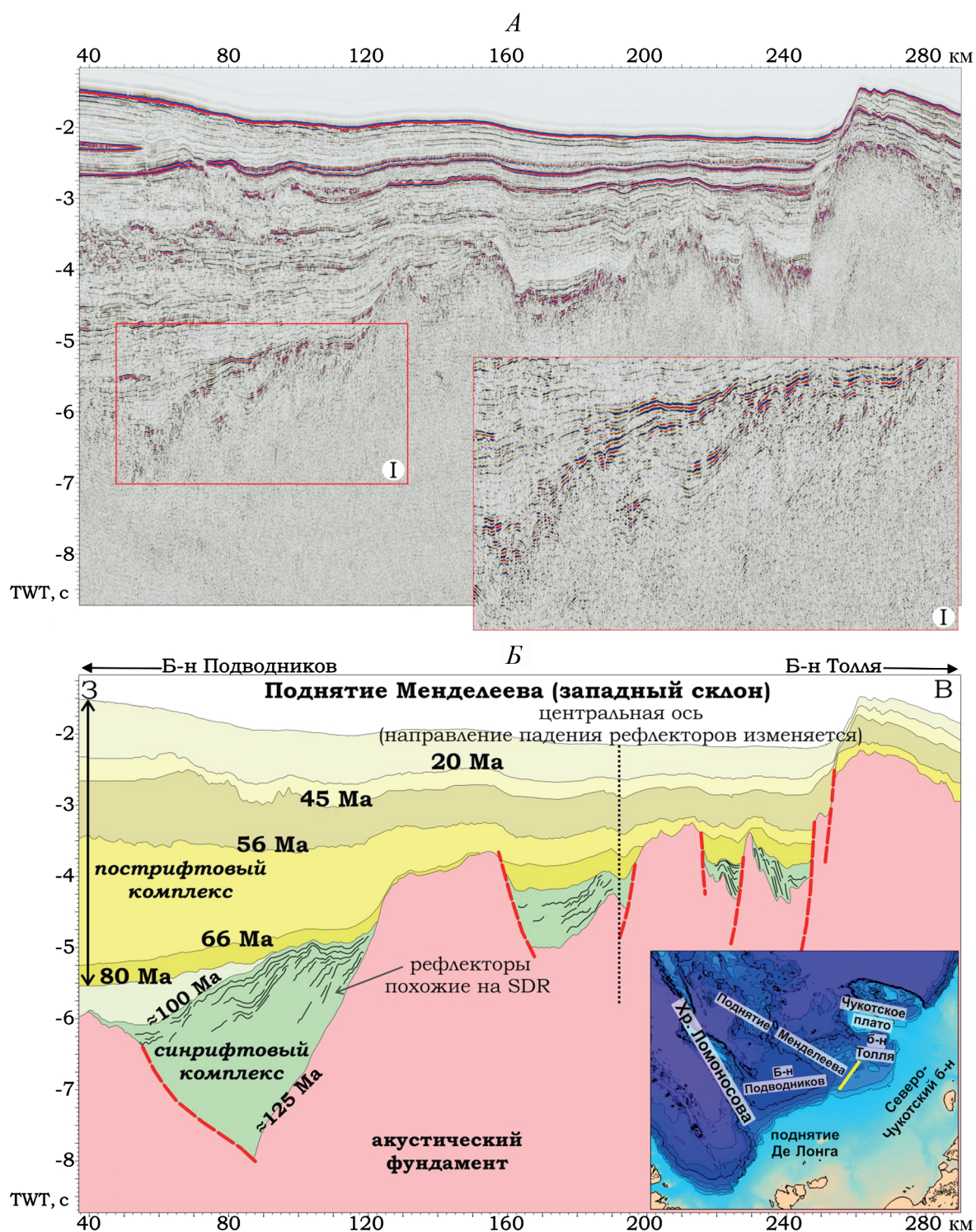


Рис. 8. Западный склон поднятия Менделеева: А — фрагмент сейсмического профиля ARC12-03; Б — его интерпретация. Локация профиля указана на врезке. В составе синрифтового комплекса выделяются рефлекторы, возможно, внутренние SDRs. В центральной части поднятия можно выделить осевую линию, у которой направление падения рефлекторов меняется на противоположное

дится V-образный симметричный трог Чарли. Над центральной частью выделяется отрицательная магнитная аномалия субмеридионального простирания протяженностью ~300 км. В самом бассейне рефлекторы, напоминающие SDRs, не обнаружены. Симметрично, с обеих сторон от впадины, на относительных поднятиях акустического фундамента залегает маломощный (~0,3 с TWT) прослой высоко-

амплитудных субгоризонтальных рефлекторов. Это могут быть базальтовые лавы и туфы или биокремнистая пачка позднемелового возраста, описанная в работе [Shimeld et al., 2011].

Бассейн Наutilus расположен между хребтом Альфа и Чукотским Бордерлендом. Со склонов этих структур в составе синрифтового комплекса, заполняющего полуграбены, в сторону бассейна на-

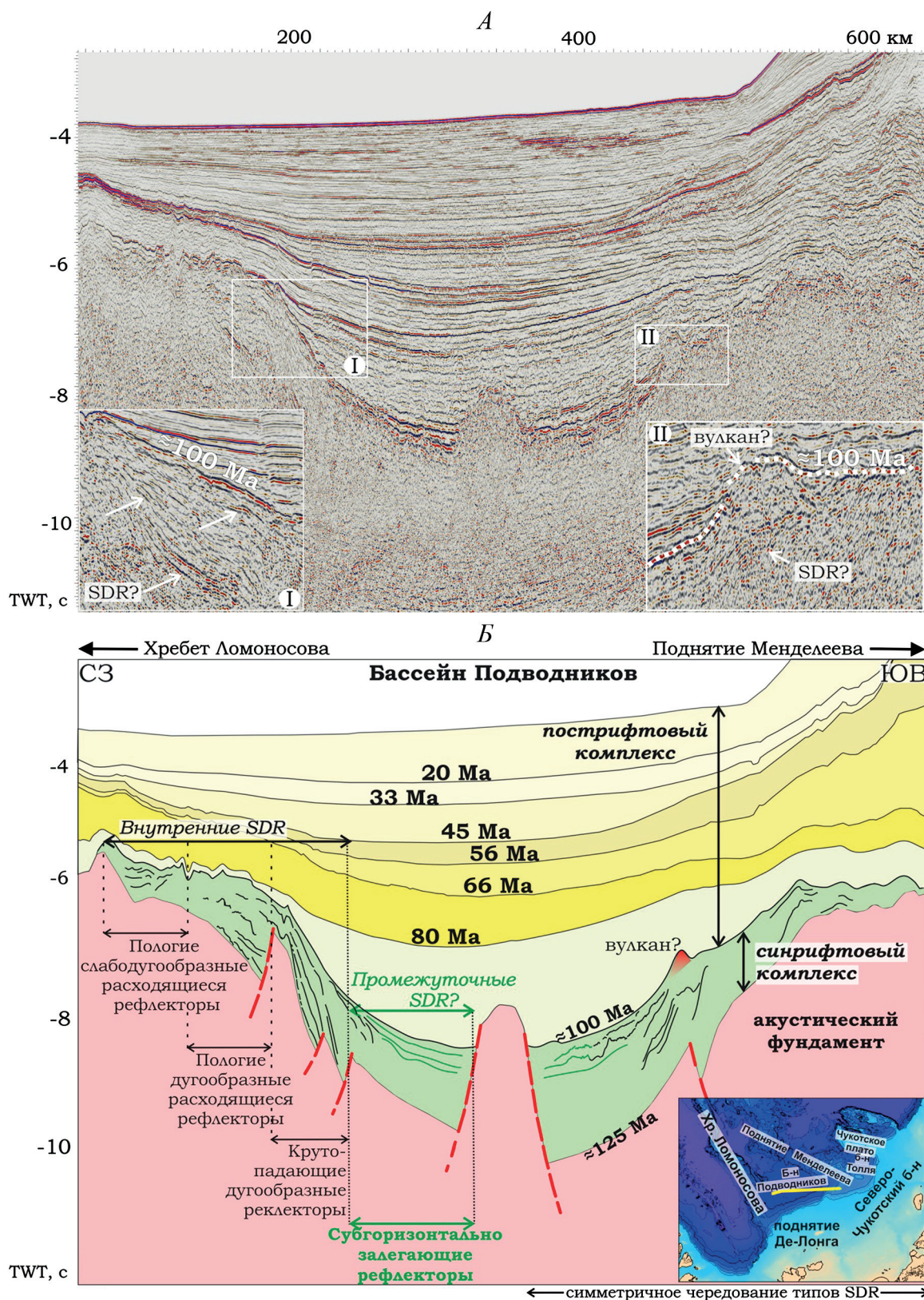


Рис. 9. Бассейн Подводников: А — фрагмент сейсмического профиля ARC14-01; Б — его интерпретация. Локация профиля указана на врезке. В центральной части бассейна выделяется тектонический выступ фундамента, в составе синрифтового комплекса выделяются встречные рефлекторы, похожие на внутренние SDRs, они наклонены в центр бассейна

клонены рефлекторы, напоминающие SDRs (рис. 10). В основании бассейна Наутилус выделяется толща субгоризонтальных рефлекторов, экранирующих низзалегавшие осадочные образования. Возможно, это биокремнистая пачка позднемелового возраста [Shimeld et al., 2011]. Под этой пачкой фрагментарно выделяются комплексы SDRs.

Бассейн Стефанссона расположен между хребтом Альфа и Канадским архипелагом. Бассейн имеет симметричное строение (рис. 6). В центральной части находится выступ акустического фундамента. На одинаковом расстоянии по обе стороны от выступа в составе синрифтового комплекса прослеживаются рефлекторы, похожие на SDRs. Клинья возможных SDRs наращивают один другой в сторону центрального поднятия. Отдельных полуграбенных выделить нельзя. Протяженность комплекса с SDRs составляет ~50 км, мощность ~1 с TWT. Эти рефлекторы похожи на классический внутренний тип SDRs (рис. 2, Б, III). В центральной части бассейна, рядом с центральным поднятием, рефлекторы выполаживаются до субгоризонтальных. Можно предположить здесь наличие промежуточных SDRs. В основании бассейна также выделяется пачка высокоамплитудных субгоризонтальных рефлекторов. Это, вероятно, та же самая пачка, что и в бассейне Наутилус (и, возможно, в бассейне Менделеева).

Поднятие Менделеева разделяет бассейн Подводников (на западе) и бассейны Толля и Менделеева (на востоке). Поднятие представляет собой приподнятый блок континентальной коры (рис. 7) [Kashubin et al., 2018; Nikishin et al., 2021b, c]. Сильнорасчлененный рельеф поднятия объясняется чередованием асимметричных впадин (полуграбенных), чередующихся с тектоническими выступами фундамента (горстами). Протяженность отдельных полуграбенных ~20–25 км. Полуграбены выполнены синрифтовыми осадками. Мощность синрифтового комплекса на поднятии Менделеева составляет ~1,5–2 с TWT. Кровля синрифтового комплекса менее отчетливая, присутствуют следы эрозии. Высокоамплитудные пологонаклонные выдержанные рефлекторы, возможные SDRs, убедительно идентифицируются только у кровли синрифтового комплекса (рис. 7). Отчетливо выделяется несколько клиньев, частично налегающих один на другой. Подошва комплекса соответствует кровле акустического фундамента. В центральной части поднятия условно можно провести осевую линию. Западнее осевой линии клинья возможных SDRs наращиваются в сторону бассейна Подводников, восточнее — в сторону бассейнов Толля и Менделеева. Под рефлекторами сейсмическая картина хаотичная. На приподнятом блоке, разделяющем два крупных полуграбена (рис. 7, I), над выступом акустического фундамента присутствует пачка высокоамплитудных горизонтально залегающих рефлекторов. Возможно, это платобазальты (или landward flows), сформировавшиеся до прогибания и образования

полуграбенных с гипотетическими наклонными SDRs. Также обнаружены высокоамплитудные рефлекторы, секущие осадки синрифтового комплекса. Их приблизительная длина более 5 км. Они начинаются в акустическом фундаменте и под пологим углом подходят к отдельным SDRs, возможно, это дайки. Присутствуют редкие блюдцеобразные короткие яркие рефлекторы — возможные силлы. В кровле отмечены постройки треугольной формы с приблизительной высотой 0,3 с TWT, напоминающие подводные вулканы.

Вышеописанные рефлекторы, похожие на SDRs, отличаются от своих классических аналогов по структурному положению — они заполняют систему полуграбенных, разделенных между собой тектоническими выступами фундамента. В полуграбене, расположенном ближе к бассейну Подводников (рис. 8, I), рефлекторы, напоминающие SDRs, больше похожи на классический внутренний тип (рис. 2, Б, I, II).

Бассейн Подводников расположен между хр. Ломоносова (на западе) и поднятием Менделеева (на востоке) (рис. 9). Бассейн имеет симметричное строение и напоминает бассейн Стефанссона. В центральной части бассейна выделяется тектонический выступ фундамента, к которому с двух противоположных сторон (со склонов хр. Ломоносова и поднятия Менделеева) в составе синрифтового комплекса сходятся высокоамплитудные, напоминающие SDRs, рефлекторы. Кровля синрифтового комплекса выделяется четко, подошва соответствует кровле акустического фундамента. На бортах бассейна можно выделить три типа рефлекторов:

- 1) наиболее отдаленные от центральной части бассейна рефлекторы характеризуются пологой слабодугообразной морфологией;

- 2) ближе к центральной части бассейна угол падения рефлекторов увеличивается. Рефлекторы первого и второго типов заполняют полуграбены. Их можно отнести к внутренним SDRs (рис. 2, Б, I, II);

- 3) в центральной части бассейна высокоамплитудные рефлекторы залегают субгоризонтально и упираются в центральное поднятие бассейна. Они полностью экранируют низзалегавшие осадки. Этот тип можно отнести к промежуточным SDRs. Между рефлекторами второго и третьего типа в кровле комплекса присутствует постройка треугольной формы высотой 0,5 с TWT — возможный подводный вулкан.

Картирование SDRs и вулканов. Расположение и направление падения похожих на SDRs рефлекторов, днища полуграбенных со следами вулканизма и без, а также положение вулканических построек были нанесены на карту акустического фундамента, построенную по результатам интерпретации 2D сейсмических профилей в ПО Petrel (рис. 10). Хотя 2D данные не позволяют оценить истинные направления падения рефлекторов, мы, тем не менее, можем выделить некоторые закономерности. Для поднятия Альфа-Менделеева выделяется осевая

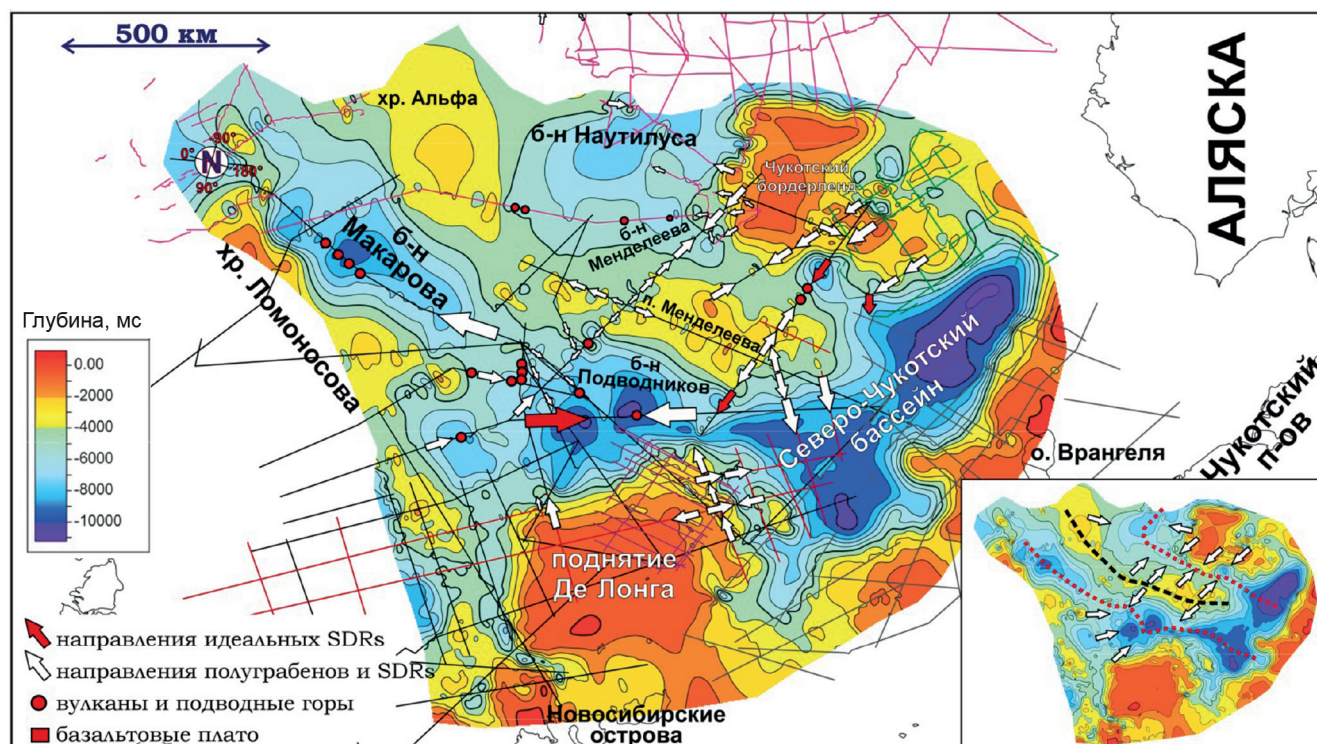


Рис. 10. Карта распространения рефлекторов, похожих на SDRs, полуграбенов, вулканов и подводных гор. Подложка — карта акустического фундамента, построенная на основе интерпретации сейсмических профилей, по [Nikishin et al., 2021b], с дополнением новыми данными. Белыми стрелками показано направление рефлекторов и полуграбенов, красными — направления наиболее похожих на классические SDRs рефлекторов. Внизу справа — врезка с обобщенными направлениями полуграбенов и рефлекторов. Черная линия — предполагаемая осевая линия для поднятия Альфа-Менделеева, красная линия — предполагаемая ось растяжения

линия. Восточнее от этой линии рефлекторы и полуграбены наклонены в сторону бассейнов Толля, Менделеева, Наутилус и Стефанссона, западнее рефлекторы и полуграбены наклонены в сторону бассейна Подводников. В бассейнах Толля, Менделеева и Наутилус присутствуют встречные рефлекторы, падающие со стороны Чукотского Бордерленда. В бассейне Подводников рефлекторы, падающие с поднятия Менделеева, встречаются у центрального поднятия с рефлекторами, падающими со стороны хр. Ломоносова. Поднятие выражено, в том числе, и на карте акустического фундамента. В бассейне Стефанссона наблюдается аналогичная картина. Рефлекторы падают к центральному поднятию со стороны хр. Альфа и континентальной окраины Канады. Гипотетические вулканические постройки распространены преимущественно в пределах глубоководных бассейнов.

Итак, раннемеловое развитие поднятия Альфа-Менделеева и сопряженных бассейнов характеризуется сильным растяжением (с образованием полуграбенов и глубоководных бассейнов) и обильным магматизмом, что связано с магматизмом HALIP.

Поднятие Альфа-Менделеева. Вероятно, до начала основной апт-альбской фазы растяжения на поднятии преобладал субаэральный базальтовый магматизм. Формировались базальтовые плато (landward flows). Затем в апт-альбское время в условиях продолжавшегося растяжения в пределах поднятий (Альфа-Менделеева, Де-Лонга, Чукотское

плато) начали формироваться полуграбены. Полуграбены заполнялись осадочным и вулканическим материалом. Возможно, происходило внедрение базальтовых силлов и даек. Соотношение магматических пород к осадочным нам не известно, но, скорее всего, в пределах поднятий оно не очень большое. Все это время поднятие Альфа-Менделеева было приподнятым стабильным участком суши и мелководного шельфа. На завершающей стадии растяжения в пределах поднятия преобладал эффузивный вулканизм. Об этом свидетельствуют обнаруженные на сейсмических профилях постройки, похожие на подводные вулканы. Поднятие во время этой фазы вулканизма развивалось в мелководно-морских, шельфовых обстановках, о чем свидетельствуют ненарушенные эрозией остроконечные вершины вулканических построек. В центральной части поднятия условно можно провести осевую линию. Западнее осевой линии клинья возможных SDRs нарастают в сторону бассейна Подводников, восточнее — в сторону бассейнов Толля, Менделеева, Наутилус и Стефанссона (рис. 10).

Сопряженные бассейны. Бассейны Подводников, Толля, Менделеева, Наутилус и Стефанссона начали свое развитие в апт-альбское время синхронно с фазой растяжения и формированием полуграбенов на поднятии Альфа-Менделеева. Об этом свидетельствует единый сейсмостратиграфический уровень синрифтового комплекса. В полуграбенах, расположенных в противоположных бортах бас-

сейнов, сформировались серии встречных клиньев из рефлекторов, похожих на SDRs. Клинья наращивают один другой к центру бассейна. Они, скорее всего, представлены переслаиванием осадочного материала с субаэральными базальтовыми лавами. Происходило внедрение даек и силлов. Точное соотношение магматического материала к осадочному не известно, но, видимо, оно больше, чем на поднятиях. Рефлекторы в составе клиньев похожи на классические внутренние SDRs. У центральных поднятий бассейнов Подводников и Стефанссона клинья SDRs выполаживаются до субгоризонтальных. Бассейны в апт-альбское время развивались в субаэральных или мелководно-морских условиях. На завершающей стадии растяжения вулканизм, так же, как и на поднятии Альфа-Менделеева, изменился на эффузивный — начали расти подводные вулканы. Бассейны продолжали развитие сначала в мелководно-морских, а затем в глубоководных условиях.

И внутренний, и промежуточный типы SDRs характерны для рифтовых бассейнов, сопряженных с вулканическими пассивными континентальными окраинами. Можно предположить, что поднятие Альфа-Менделеева в апт-альбское время развивалось, как двусторонняя вулканическая пассивная континентальная окраина для бассейнов Подводников на западе и Толля, Менделеева, Наутилус и Стефанссона на востоке. Развитие вулканической окраины, как и развитие океанических бассейнов, было прервано до начала спрединга и образования океанической коры.

Выводы. 1. В пределах поднятия Альфа-Менделеева и сопряженных бассейнов выделяется синрифтовый сейсмостратиграфический комплекс, выполняющий полуграбени и относительные поднятия.

2. В синрифтовом сейсмостратиграфическом комплексе зафиксированы следующие следы магматизма: платобазальты, дайки и силлы, субаэральные и шельфовые базальты SDRs и вулканы. Синрифтовый комплекс с потенциальными SDRs одновозрастен с магматизмом HALIP и с учетом известных изотопных датировок возраста магматических пород для поднятия Альфа-Менделеева имеет возраст ~125–100 Ма.

3. Можно выделить два типа рефлекторов, похожих на SDRs. Первый тип распространен на поднятиях Альфа-Менделеева, Де-Лонга и Чукотском плато в полуграбенах, разделенных поднятиями акустического фундамента. На вершинах этих под-

нятий присутствуют субгоризонтально залегающие дорифтовые платобазальты (landward flows). Вторым типом рефлекторов, похожих на SDRs, распространен в бассейнах. Рефлекторы этого типа образуют серии непрерывно наращивающихся к центру бассейнов клиньев. Эти рефлекторы похожи на классические внутренние SDRs. Они сменяются более пологозалегающими рефлекторами, похожими на промежуточные SDRs. Вероятно, в пределах бассейнов в составе синрифтового комплекса с SDRs второго типа магматического материала больше, чем в аналогичном комплексе с SDRs первого типа в пределах поднятий.

4. В кровле синрифтового комплекса часто присутствуют постройки, напоминающие подводные вулканы. Эти локальные проявления эффузивного вулканизма продолжались после синрифтового этапа развития приблизительно до 80–90 Ма. В течение этого времени обстановка осадконакопления сменилась с субаэральной на относительно глубоководную в результате пострифтового прогибания бассейнов.

5. Вдоль поднятия Альфа-Менделеева через его центр можно провести осевую линию. Западнее осевой линии клинья возможных SDRs наращиваются в сторону бассейна Подводников, восточнее — в сторону бассейнов Толля, Менделеева, Наутилус и Стефанссона. Рефлекторы сходятся в центральных частях бассейнов. Здесь проходят центральные оси растяжения.

6. Поднятие Альфа-Менделеева и бассейны Подводников, Толля, Менделеева, Наутилус и Стефанссона развивались синхронно в апт-альбское время под влиянием рифтинга и обширного магматизма. Поднятие Альфа-Менделеева развивалось, как двуправленная вулканическая континентальная окраина для будущих океанических бассейнов Подводников, Толля, Менделеева, Наутилус и Стефанссона. Их развитие прервалось до спрединга и образования океанической коры.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Ф. Вернеру, Л. Джеофрью, Д. Франке за рекомендации по улучшению интерпретации сейсмических данных. Основные положения работы были обсуждены с Дж. Фолгером и С. Клутинг. Авторы благодарны Г.Л. Лейченкову, С.Г. Сколотневу, С.Ю. Соколову, А.А. Черных, В.А. Савину, Д.А. Застрожнову, А.В. Латышеву и С.И. Фрейману за рецензирование работы.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гусев Е.А., Лукашенко Р.В., Попко А.О. и др. Новые данные о строении склонов подводных гор поднятия Менделеева (Северный Ледовитый океан) // Докл. РАН. 2014. Т. 455, № 2. С. 184–188.

Драчев С.С. Тектоника и мезокайнозойская геодинамика района Новосибирских островов: Автореф. канд. дисс. М., 1989.

Дараган-Суцкова Л.А., Зинченко В.Н., Дараган-Суцков Ю.И., Савельев И.Н. О времени главного погружения

до океанических глубин и масштабах разновозрастного рифтогенеза в Арктическом бассейне по результатам интерпретации сейсмических данных // Региональная геология. 2019. № 80. С. 1–16.

Дараган-Суцкова Л.А., Соболев Н.Н., Петров Е.О. и др. К обоснованию стратиграфической привязки опорных сейсмических горизонтов на Восточно-Арктическом шельфе и в области Центрально-Арктических поднятий // Региональная геология. 2014. № 58. С. 5–21.

- Косько М.К., Соболев Н.Н., Кораго Е.А и др. Геология Новосибирских островов — основа интерпретации геофизических данных по Восточно-Арктическому шельфу России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2013. Т. 8, № 2. С. 1–36.
- Морозов А.Ф., Петров О.В., Шокальский С.П. и др. Новые геологические данные, обосновывающие континентальную природу области Центрально-Арктических поднятий // Региональная геология и металлогения. 2013. № 53. С. 34–55.
- Никушин А.М., Петров Е.И., Малышев Н.А., Еришова В.П. Рифтовые системы шельфа Российской Восточной Арктики и арктического глубоководного бассейна: связь геологической истории и геодинамики // Геодинамика и геофизика. 2017. № 8 (1). С. 11–43.
- Поселов В.А., Верба В.В., Жолондз С.М., Буценко В.В. Поднятия Американо-Северного бассейна в Северном Ледовитом океане и возможные аналоги в Атлантическом океане // Океанология. 2019. Т. 59, № 5. С. 810–825. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574595810-825>
- Сколотнев С.Г., Федонкин М.А., Корнийчук А.В. Новые данные о геологическом строении юго-западной части поднятия Менделеева (Северный Ледовитый океан) // Докл. РАН. 2017. Т. 476, № 2. С. 190–196.
- Сколотнев С.Г., Фрейман С.И., Хисамутдинова А.И. и др. Осадочные породы фундамента поднятия Альфа-Менделеева в Северном Ледовитом океане // Литология и полезные ископаемые. 2022. № 2. С. 136–160. <https://doi.org/10.31857/S0024497X22020082>
- Abdelmalak M.M., Meyer R., Planke S. et al. Pre-breakup magmatism on the Vøring Margin: Insight from new sub-basalt imaging and results from Ocean Drilling Program Hole 642E // Tectonophysics. 2016. Vol. 675. P. 258–274. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.02.037>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.08.002>
- Brumley K. Geologic history of the Chukchi Borderland, Arctic Ocean // Stanford University, 2014.
- Calves G., Schwab A.M., Huuse M. et al. Seismic volcanostratigraphy of the western Indian rifted margin: The pre-Deccan igneous province // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116. P. 1–28. DOI: 10.1029/2010JB0080862
- Chernykh A., Glebovsky V., Zykov M., Korneva M. New insights into tectonics and evolution of the Amerasia Basin // J. Geodyn. 2018. Vol. 119. P. 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.02.010>
- Conti B., Perinotto J.A. de J., Veroslavsky G. et al. Speculative petroleum systems of the southern Pelotas Basin, offshore Uruguay // Mar. and Petrol. Geol. 2017. Vol. 83. P. 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.02.022>
- Dove D., Coakley B., Hopper J. et al. Bathymetry, controlled source seismic and gravity observations of the Mendeleev ridge; implications for ridge structure, origin, and regional tectonics // Geophys. 2010. N 183. P. 481–502.
- Drachev S., Saunders A. The Early Cretaceous Arctic LIP: its geodynamic setting and implications for Canada Basin opening // Proceed. Fourth Internat. Confer. on Arctic Margins ICAM IV. US Department of the Interior, 2006. P. 216–223.
- 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. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.ir.104.1987>
- Elliott G.M., Parson L.M. Influence of margin segmentation upon the break-up of the Hatton Bank rifted margin, NE Atlantic // Tectonophysics. 2008. Vol. 457, Iss. 3–4. P. 161–176. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.06.008>
- Estrada S., Damaske D., Henjes-Kunst F. et al. Multistage Cretaceous magmatism in the northern coastal region of Ellesmere Island and its relation to the formation of Alpha Ridge — evidence from aeromagnetic, geochemical and geochronological data // Norweg. J. Geol. 2016. Vol. 96. P. 1–31. <http://dx.doi.org/10.17850/njg96-2-03>
- Evangelatos J., Funck T., Mosher D.C. The sedimentary and crustal velocity structure of Makarov Basin and adjacent Alpha Ridge // Tectonophysics. 2017. Vol. 696–697. P. 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.12.026>
- Evangelatos J., Mosher D.C. Seismic stratigraphy, structure and morphology of Makarov Basin and surrounding regions: tectonic implications // Marine Geol. 2016. Vol. 374. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.01.013>
- Gaina C., Werner S.C., Saltus S. et al. Circum-Arctic mapping project: new magnetic and gravity anomaly maps of the Arctic // Arctic Petrol. Geol. Soc. Memoir. 2011. Vol. 35. P. 39–48.
- Geoffroy L. Volcanic passive margins // Comptes Rendus Geosci. 2005. N 337, Iss. 16. P. 1395–1408. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.10.006>
- Geoffroy L., Burov E.B., Werner P. Volcanic passive margins: another way to break up continent s// Sci. Rep. 2015. Vol. 5. P. 1–12. <https://doi.org/10.1038/srep14828>
- Geoffroy L., Guan H., Gernigon L. et al. The extent of continental material in oceans: C-Blocks and the Laxmi Basin example // Geophys. J. Intern. 2020. Vol. 222. P. 1471–1479. DOI: 10.1093/gji/ggaa215.
- Harkina C., Kuszniira 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. 104235. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104235>
- Hinz K. A hypothesis on terrestrial catastrophes; wedges of very thick oceanward dipping layers beneath passive continental margins// Geologisches Jahrbuch Reihe Geophysic. 1981. Bd. 22. S. 3–28.
- Ilhan I., Coakley B.J. Meso-Cenozoic evolution of the southwestern Chukchi Borderland, Arctic Ocean // Mar. Petrol. Geol. 2018. Bd 95. P. 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.04.014>
- Jackson H.R., Chian D. The Alpha-Mendeleev ridge a large igneous province with continental affinities // GFF. 2019. <https://doi.org/10.1080/11035897.2019.1655789>
- Jakobsson M., Grantz A., Kristoffersen Y., Macnab R. Physiographic provinces of the Arctic Ocean seafloor // Geol. Soc. Amer. Bull. 2003. N 115. P. 1443–1455.
- Jokat W. Scientific Deep drilling in the Arctic Ocean: Status of the Seismic site survey data base // Polarforschung. 2012. Vol. 82 (1) P. 73–81.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.03.006>
- Koopmann H., Franke D., Schreckenberger B. et al. Segmentation and volcano-tectonic characteristics along the SW African continental margin, South Atlantic, as derived from multichannel seismic and potential field data // Mar. Petrol. Geol. 2014. Vol. 50. P. 22–39. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.10.016>

- Larsen L., Pederen A., Tegner C. et al. Age of Tertiary volcanic rocks on the West Greenland continental margin: Volcanic evolution and event correlation to other parts of the North Atlantic Igneous Province // *Geol. Mag.* 2016. Vol. 153 (3). P. 487–511. DOI: 10.1017/S0016756815000515
- Lebedeva-Ivanova N., Gaina C., Minakov A., Kashubin S. ArcCRUST: Arctic crustal thickness from 3D gravity inversion // *Geochem., Geophysic., Geosystems*. 2019. Vol. 20. P. 3225–3247. <https://doi.org/10.1029/2018GC008098>.
- 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. <https://doi.org/10.1029/2017TC004923>
- 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 // *Marin. Geol.* 2009. Vol. 261, Iss. 1–4. P. 3–16. ISSN 0025-3227. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.02.007>.
- Mukasa S.B., Andronikov A., Brumley K. et al. Basalts from the Chukchi Borderland: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and geochemistry of submarine intraplate lavas dredged from the western Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.: Solid Earth. Amer. Geophys. Union (AGU)*. 2020. Vol. 125 (7). DOI: 10.1029/2019JB017604
- Nemcok M., Rybar S. Rift-drift transition in a magma-rich system: the Gop Rift-Laxmi Basin case study, West India // *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 2016. Vol. 455. <http://dx.doi.org/10.1144/SP445.5>
- Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S. et al. Arctic Ocean Mega Project: Pap. 1 — Data collection. *Earth. Sci. Rev.* 2021a. Vol. 217. 103559. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103559>.
- Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S. et al. Arctic Ocean Mega Project: Pap. 2 — Arctic stratigraphy and regional tectonic structure // *Earth. Sci. Rev.* 2021b. 217. 103581. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103581>
- Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S. et al. Arctic Ocean Mega Project: Pap. 3 — Mesozoic to Cenozoic geological evolution // *Earth. Sci. Rev.* 2021c. 217. 103034. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103034>
- Oakey G.N., Saltus R.W. Geophysical analysis of the Alpha-Mendeleev ridge complex: Characterization of the High Arctic Large Igneous Province // *Tectonophysics*. 2016. Vol. 691. P. 65–84. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.08.005>
- Paton D.A., Pindell K., McDermott K. et al. Evolution of seaward-dipping reflectors at the onset of oceanic crust formation at volcanic passive margins: Insights from the South Atlantic // *Geology*. 2017. Vol. 45(5). P. 439–442. <https://doi.org/10.1130/g38706.1>
- Petrov O., Morozov A., Shokalsky S. et al. Crustal structure and tectonic model of the Arcticregion // *Earth. Sci. Rev.* 2016. N 154. P. 29–71.
- Piskarev A., Poselov V., Kaminsky V. *Geologic Structures of the Arctic Basin* // Springer Intern. Publ. Cham. 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77742-9>
- 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. <https://doi.org/10.1029/94JB00468>.
- Planke S., Symonds P.A., Alvestad E., Skogseid J. Seismic volcanostratigraphy of large-volume basaltic extrusive complexes on rifted margins // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105 (B8). P. 19335–19351. <https://doi.org/10.1029/1999JB900005>
- Poselov V.A., Butsenko V.V. et al. Seismic Stratigraphy of Sedimentary Cover in the Podvodnikov Basin and North Chukchi Trough // *Dokl. Earth Sci.* 2017. Vol. 474 (2). P. 688–691. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17060137>
- Saltus R.W., Miller E.L., Gaina C., Brown P.J. Chapter 4 Regional magnetic domains of the Circum-Arctic: a framework for geodynamic interpretation // *Geol. Soc. Lond.* 2011. Vol. 35 (1). P. 49–60. <https://doi.org/10.1144/M35.4>
- Sapin F., Ringenbach J.C., Clerc C. Rifted margins classification and forcing parameters // *Sci. Rep.* 2021. Vol. 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87648-3>
- Shimeld J.W., Boggild K., Mosher D.C., Jackson H.R. Re-processed 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 // *Geol. Surv. of Canada*. 2021. Open File 8850, 2021. <https://doi.org/10.4095/329248>
- Shimeld J.W., Chia D., Jackson H.R. et al. Evidence for an important tectonostratigraphic seismic marker across Canada Basin and southern Alpha Ridge of the Arctic Ocean // *Geol. Surv. of Canada*. 2011. Open File 6822. DOI: 10.4095/289234
- Skaarup N., Jackson H.R., Oakey G. Margin segmentation of Baffin Bay/Davis Strait, eastern Canada based on seismic reflection and potential field data // *Marin. Petrol. Geol.* 2006. Vol. 23 (1). P. 127–144. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2005.06.002>
- Skolotnev S., Aleksandrova G. et al. Fossils from seabed bedrocks: Implications for the nature of the acoustic basement of the Mendeleev Rise (Arctic Ocean) // *Marin. Geol.* 2019. Vol. 407. P. 148–163. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.11.002>.
- Skolotnev S.G., Fedonkin M.A., Korniyshuk A.V. New data on the geological structure of the southwestern Mendeleev Rise, Arctic Ocean // *Dokl. Earth Sci.* 2017. Vol. 476. P. 1001–1006. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17090173>
- Vail P.R., Mitchum R.M. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, 1, Overview // *Mem. Amer. Assoc. Petrol. Geol.* 1977. Vol. 22. P. 51–52.
- Van Wagoner N.A., Williamson M.-C., Robinson P.T., Gibson I.L. First samples of acoustic basement recovered from the Alpha Ridge, Arctic Ocean: new constraints for the origin of the ridge // *J. Geodyn.* 1986. Vol. 6. P. 177–196.
- Watkinson M.P., Hart M.B., Joschi A. Cretaceous tectonostratigraphy and the development of the cauvery Basin southeast India // *Petrol. Geosci.* 1977. Vol. 13. P. 181–191.
- Weber J.K. The Structures of the Iceland-Faeroe Ridge, Implications for the Alpha Ridge, Arctic Ocean and North Atlantic: Comparisons and Evolution of the Canada Basin // *Marin. Geol.* 1990. Vol. 93. P. 43–68.
- Weigelt E., Jokat W., Franke D. Seismostratigraphy of the Siberian Sector of the Arctic Ocean and adjacent Laptev Sea Shelf // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2014. Vol. 119. P. 5275–5289. doi:10.1002/2013JB010727.
- Williamson M.-C., Kellett D., Miggins D. et al. Age and Eruptive Style of Volcanic Rocks Dredged from the Alpha Ridge, Arctic Ocean // *Geophys. Res. Abstr. EGU General Assembly*. 2019. Vol. 21. EGU2019-6336.
- White R.S., Smith L.K. Crustal structure of the Hattton and the conjugate East Greenland rifted volcanic continental margins, NE Atlantic // *J. Geophys.* 2009. Vol. 114 (B2). <https://doi.org/10.1029/2008JB005856>