

УДК 550.8.01. 550.85

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-4-102-115

СТРУКТУРА ФУНДАМЕНТА ПРИЛАПТЕВОМОРСКОЙ ЧАСТИ ЕВРАЗИЙСКОГО БАСЕЙНА ПО ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Ксения Федоровна Алёшина¹✉, Анатолий Михайлович Никишин²,
Елизавета Андреевна Родина³, Владимир Евгеньевич Вержбицкий⁴,
Виктор Юрьевич Татаринов⁵

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kfstartseva@gmail.com ✉,
<https://orcid.org/0009-0000-6261-4110>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; amnikishin@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-5375-6237>

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

⁴ ПАО «НК «Роснефть», Москва, Россия; v_verzhbitskiy@rosneft.ru

⁵ Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, Москва, Россия; vtatarinov@rosnedra.gov.ru

Аннотация. Прилаптевоморская часть Евразийского бассейна — это область перехода от спрединга к внутриплитным рифтовым обстановкам. Предложен подход к построению 3D-модели фундамента прилаптевоморской части Евразийского бассейна на основе увязки всех имеющихся на сегодняшний день геолого-геофизических данных. Для структуры акустического фундамента Евразийского бассейна в поперечном сечении характерно чередование впадин и поднятий. Разреженность данных сейсморазведки не позволяет непосредственно проследить простираание этих структур, однако они могут быть соотнесены линейностью, устанавливаемой по данным грави- и магниторазведки и связанной с постепенным раскрытием бассейна. Для прилаптевоморской части Евразийского бассейна, где по магнитным данным линейность перестает прослеживаться, предложена методика установления простираания структур фундамента на основе сейсмостратиграфического анализа. Новая 3D-модель акустического фундамента исследуемой области легла в основу тектонической схемы всего Евразийского бассейна. В модели отражены основные этапы развития бассейна: континентальный рифтинг до 56 млн л. н., «нормальный» спрединг 56–45 млн л. н., ультрамедленный спрединг 45–34 млн л. н., «ультра-ультрамедленный» спрединг 34–20 млн л. н. Южная часть исследуемой области перекрыта осадочным чехлом с возрастом 20 млн лет и моложе, что связывается с прекращением спрединга здесь не позднее 20 млн л. н.

Ключевые слова: Евразийский бассейн, море Лаптевых, хребет Гаккеля, ультрамедленный спрединг, сейсмостратиграфия, акустический фундамент

Для цитирования: Алёшина К.Ф., Никишин А.М., Родина Е.А., Вержбицкий В.Е., Татаринов В.Ю. Структура фундамента прилаптевоморской части Евразийского бассейна по геофизическим данным // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 4. С. 102–115.

STRUCTURE OF THE BASEMENT OF THE NEAR-LAPTEV PART OF THE EURASIAN BASIN ACCORDING TO GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL DATA

Kseniya F. Aleshina¹✉, Anatoly M. Nikishin², Elizaveta A. Rodina³,
Vladimir E. Verzhbitsky⁴, Viktor Yu. Tatarinov⁵

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kfstartseva@gmail.com ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; amnikishin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5375-6237>

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

⁴ Rosneft Oil Company, Moscow, Russia; v_verzhbitskiy@rosneft.ru

⁵ Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystallochemistry of Rare Elements, Moscow, Russia; vtatarinov@rosnedra.gov.ru

Abstract. The near-Laptev part of the Eurasian basin is the area of transition from modern spreading to intraplate rifting. We propose an approach to the construction of a 3D model of the basement of the Laptev Sea part of the Eurasian basin based on the linkage of all currently available geological and geophysical data. The structure of the acoustic basement of the Eurasian basin is characterized by alternating troughs and highs in cross-section. The sparse seismic data do not allow us to directly trace the strike of these structures, but they can be correlated with the linearity established by gravity and magnetic data and related to the sequential opening of the basin. For the Laptev Sea part of the Eurasian basin, where linearity is no longer traceable from magnetic data, we propose a method of determining the strike of the basement structures on the basis of seismic stratigraphic analysis. The new 3D model of the acoustic basement in the studied area provided the basis for the tectonic scheme of the entire Eurasian basin. The model reflects the main stages of basin development: continental rifting up to 56 Ma, normal spreading 56–45 Ma, ultra-slow spreading 45–34 Ma, ultra-ultra-slow spreading 34–20 Ma. The southern part of the study area is overlain

by a sedimentary cover with an age of 20 Ma and younger, which is associated with the cessation of spreading here no later than 20 Ma.

Keywords: Eurasian basin, Laptev Sea, Gakkel Ridge, ultraslow spreading, seismic stratigraphy, acoustic basement

For citation: Aleshina K.F., Nikishin A.M., Rodina E.A., Verzhbitsky V.E., Tatarinov V.Yu. Structure of the base-
ment of the near-Laptev part of the Eurasian basin according to geological and geophysical data. *Moscow University
Geol. Bull.* 2024; 4: 102–115. (In Russ.).

Введение. Евразийский бассейн представляет собой продолжение Северо-Атлантического бассейна, и простирается от пролива Фрама до шельфа моря Лаптевых (рис. 1). Он отделяет хребт Ломоносова от шельфа Баренцева и Карского морей. В строении Евразийского бассейна выделяются центральный хребт Гаккеля, бассейны Нансена и Амундсена.

Непосредственно Евразийский бассейн не изучен глубоким бурением. Основу современных пред-

ставлений о его геологии составляют данные драгирования морского дна [Jokat, et al., 2019; Michael, et al., 2003; Каминский и др., 2023], 2D-сейсморазведки, площадной грави- и магниторазведки [Глебовский и др., 2018], увязанные с данными бурения на хребте Ломоносова [Backman, et al., 2008; Nikishin, et al., 2021], а также на прилегающих шельфах, например, вблизи о-вов Де-Лонга [Петров и др., 2023], и на суше [Petrov and Smelror, 2021]. Для Евразийского бассейна характерны линейные магнитные аномалии (ЛМА)

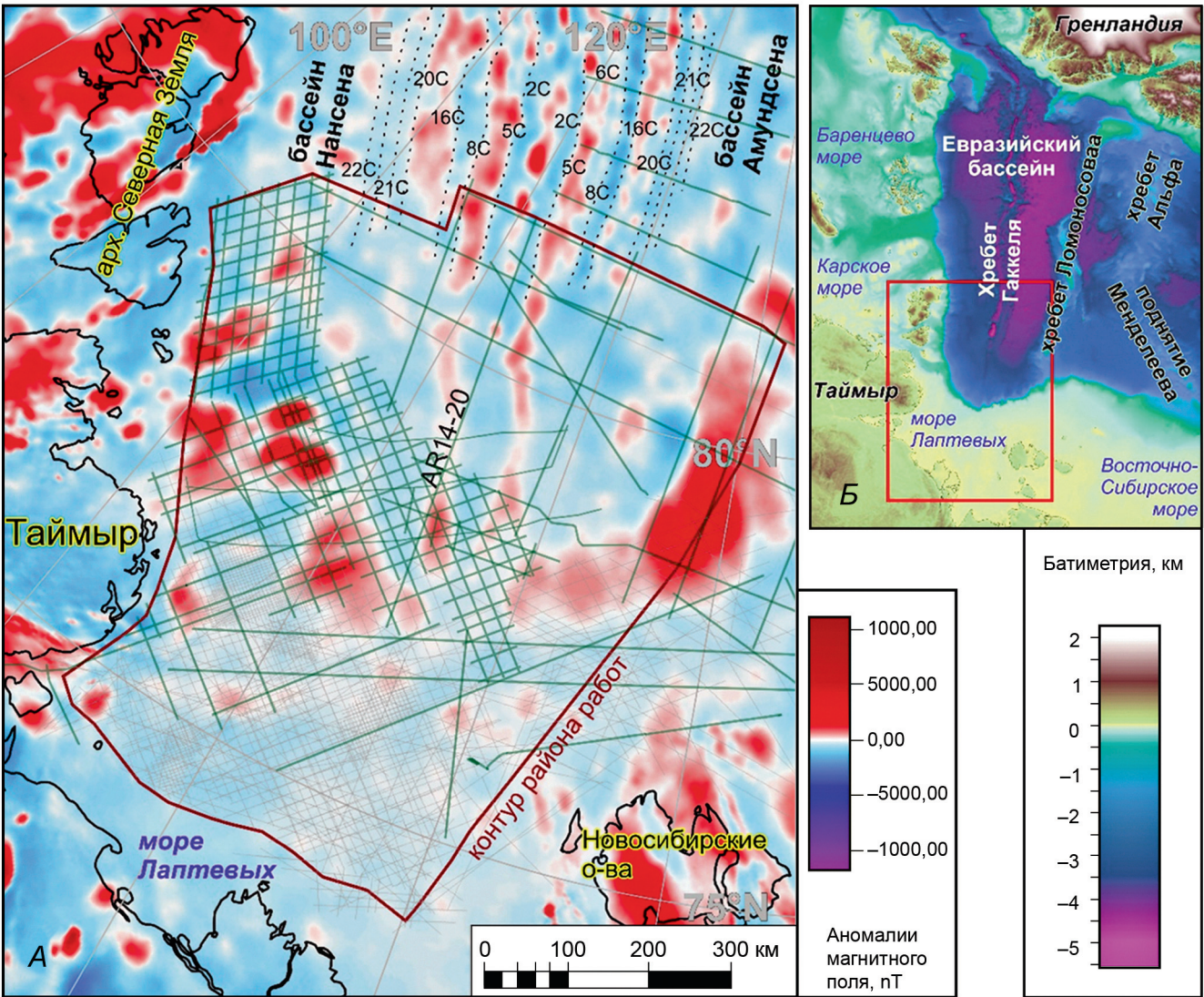


Рис. 1. А — карта магнитных аномалий в районе исследования [Glebovsky et al., 2006]. Серый пунктир — контуры ЛМА, прослеживаемых из северной части Евразийского бассейна (по [Brozena et al., 2003; Chernykh et al., 2023]), зеленые сплошные линии — сейсмопрофили, по которым была прослежена граница акустического фундамента в Евразийском бассейне и несогласие break-up (~56 млн лет), серые сплошные линии — профили корреляции фундамента бассейна моря Лаптевых. Б — карта батиметрии, красным прямоугольником отмечено положение карты А. Возраста ЛМА: 2С ~5 млн л, 5С ~10 млн л, 6С ~20 млн л, 8С ~25 млн л, 16С ~35 млн л, 20С ~43,5 млн л, 21С ~47 млн л, 22С ~50 млн л

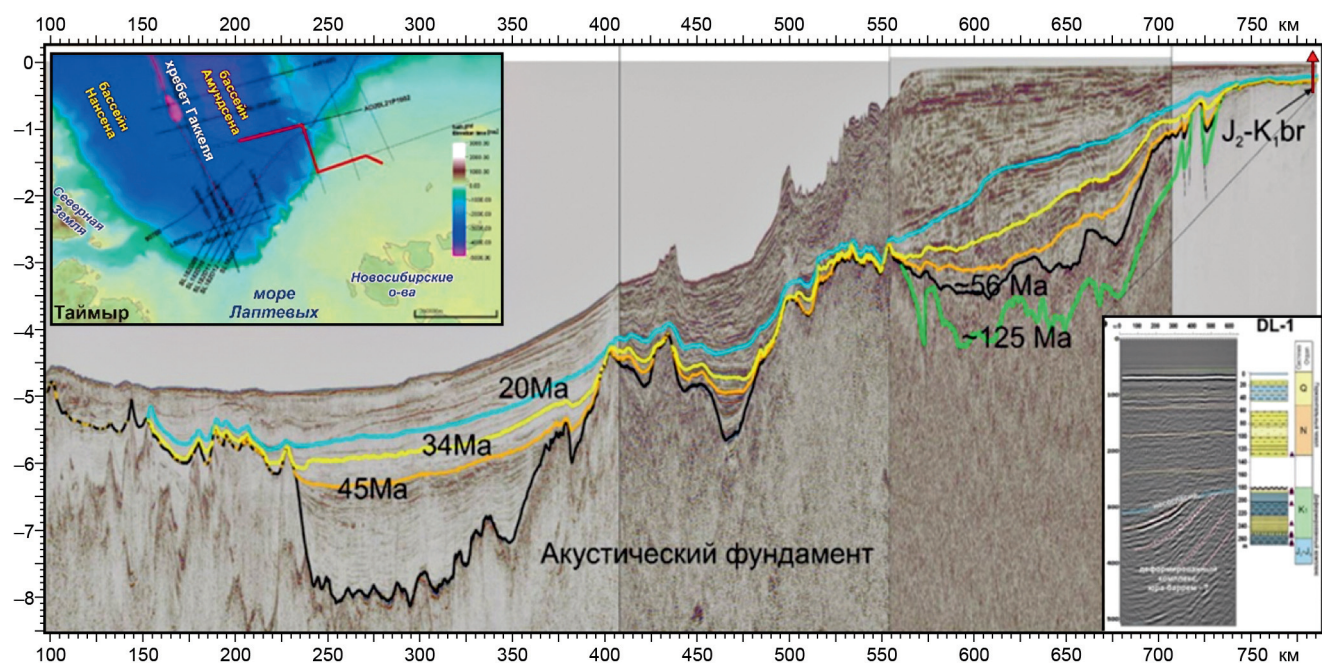


Рис. 2. Схема привязки сейсмо-стратиграфических комплексов Евразийского бассейна к скважине DL-1, пробуренной вблизи островов Де-Лонга [Петров и др., 2023]. Фрагменты профилей АО20L21, ARC-P23, ARC12-16, DL1101

(рис. 1). Преобладающей на сегодняшний день является концепция постепенного раскрытия океанического бассейна [Brozena, et al., 2003; Chernykh, et al., 2023; Glebovsky, et al., 2006; Nikishin, et al., 2021; Piskarev, et al., 2019; Weigelt, et al., 2014; Карасик, 1973], на основе которой разработаны схемы стратиграфии, которые увязывают возраст ЛМА и горизонтов, выделяемых на сеймопрофилях.

На сегодняшний день установлено, что Евразийский бассейн развивается в уникальных обстановках ультрамедленного спрединга, изучение которых продолжается до сих пор [Bird, et al., 2017; Chernykh, et al., 2023; Sauter, et al., 2013; Theunissen and Huismans, 2022]. На основе данных драгирования и геофизического моделирования было определено, что кора в Евразийском бассейне может варьировать от гипер-растянутой континентальной [Funck, et al., 2022] и нормальной океанической до серпентинитовой, т.е. представлять собой эксгумированную мантию [Jokat, et al., 2019; Jokat and Schmidt-Aursch, 2007; Lutz, et al., 2018]. Установлено, что в продольном сечении Евразийского бассейна вдоль хребта Гаккеля наблюдается чередование сегментов [Michael, et al., 2003]: 1) условно «амагматических», протяженных и сложенных в основном серпентинитами, перидотитами с долей базальтового материала, и 2) условно «магматических» сегментов, сложенных в основном базальтами, и вытянутых в узкие цепочки вкрест простирания современной рифтовой долины.

Таким образом, в Евразийском бассейне предполагается многообразие состава коры. Вероятные геодинамические причины этого многообразия могли бы быть установлены на основе изучения морфоло-

гии океанической коры в масштабе всего бассейна. В свою очередь, детали морфологии могут быть определены по региональным 2D-сеймопрофилям, поскольку граница предполагаемых пород океанической коры и перекрывающих глубоководных осадков выражена на них в виде высокоамплитудных рефлекторов на границе раздела акустического фундамента и осадочного чехла. Следовательно, актуальной является задача создания модели морфологии акустического фундамента Евразийского бассейна.

Трудность при этом составляет существующая на сегодняшний день разреженность данных сейсморазведки. В рамках данной работы предлагается подход к решению этой проблемы на основе комплексирования данных сейсморазведки со всеми доступными данными о геологическом строении Евразийского бассейна.

Для исследования выбран район работ, находящийся на сочленении Евразийского бассейна и прилегающего шельфа моря Лаптевых. Выбор района был определен, во-первых, тем, что в его пределах представлены обстановки как современного спрединга океанической коры, так и его прекращения; во-вторых, для этого района в 2020–2022 гг. были получены новые данные глубинной сейсморазведки; в-третьих, в 2022 г. вблизи этого района пробурены скважины, позволяющие выполнить привязку сейсмо-стратиграфических комплексов (рис. 2).

Исходя из имеющегося на сегодняшний день массива геолого-геофизических данных о Евразийском бассейне, предлагается методика построения такой схемы морфологии его фундамента, которая объединяла бы в себе все эти данные и отражала

современные представления о геодинамическом развитии изучаемого региона.

Материалы и методы. Основу модели фундамента составляет сейсмическая корреляция акустического фундамента по сети сейсмопрофилей МОВ-ОГТ, пересекающих Евразийский бассейн. Профили, использованные в работе, показаны на рис. 1. В их перечень входят:

- региональные профили Государственной съемки 2011, 2012, 2014, 2020 гг.;

- профили, полученные в 2018 г. по Таймырско-Североземельскому участку (съемка TS182D) и в зоне сочленения Евразийского бассейна и шельфа моря Лаптевых (съемка SL182D), а также данные съемки 2022 г., выполненные на участке SL;

- профили, полученные в 2011–2013 гг. (съемка NWL и PT) для шельфа моря Лаптевых и другие.

На сейсмопрофилях, пересекающих Евразийский бассейн, видно, что для геометрии его акустического фундамента характерно чередование локальных поднятий и впадин (рис. 3). Разреженность сейсмических данных в большей части бассейна (см., например, рис. 1) не позволяет непосредственно проследить простираие этих структур, но комплексирование разнородных данных позволяет решить эту проблему.

Во-первых, в рельефе дна изучаемой области выделяется осевая долина хребта Гаккеля. При этом на сейсмопрофилях видно, что рельеф фундамента в осевой впадине практически повторяет рельеф дна (см. рис. 3). Таким образом, используя данные батиметрии, можно в первом приближении интерполировать фундамент рифтовой долины между сейсмопрофилями вдоль хребта Гаккеля.

Во-вторых, по грави- и магнитным данным [Gaina, et al., 2011; Глебовский и др., 2018] наблюдается линейность, связанная с постепенным раскрытием бассейна. Было сделано предположение, что эта линейность может совпадать с линейностью структур акустического фундамента, выделяемых на сейсмопрофилях. Данные грави- и магниторазведки часто имеют более плотную сеть исследования, чем данные сейсморазведки, поэтому могут быть использованы для уточнения модели фундамента.

Сложность заключается в том, что линейность, хорошо прослеживаемая в центральных частях Евразийского бассейна, перестает прослеживаться в направлении к изучаемой прилаптевоморской части бассейна (см. рис. 1). Для уточнения модели фундамента в этой области был применен метод сеймостратиграфии. Для построения модели сеймостратиграфии были использованы датировки линейных магнитных аномалий, приведенные в работах [Brozena, et al., 2003; Chernykh, et al., 2023], данные драгирования дна Евразийского бассейна и бурения скважин в сопряженных акваториях [Backman, et al., 2008; Michael, et al., 2003; Nikishin, et al., 2021; Каминский и др., 2023; Петров и др., 2023], и результаты геологических исследований на суше,

прилегающей к району исследований, обобщение которых, например, приведено в работе [Petrov and Smelror, 2021]. В результате была получена модель фундамента, которая объединяет в себе весь комплекс имеющихся разнородных данных.

Сеймостратиграфия и магнитостратиграфия прилаптевоморской части Евразийского бассейна. В основе современных моделей стратиграфии Евразийского бассейна лежит увязка осадочных комплексов, выделяемых на сейсмопрофилях, с линейными магнитными аномалиями [Nikishin, et al., 2021; Piskarev, et al., 2019; Weigelt, et al., 2014]. В прилаптевоморской части бассейна магнитное поле имеет особенности, которые необходимо учитывать при построении модели фундамента.

В целом для Евразийского бассейна характерны протяженные линейные магнитные аномалии (ЛМА), датированные от 0 до ~56 млн лет [Glebovsky, et al., 2006]. В центральных частях бассейна выделяются аномалии от C1 до C24, выделение аномалий C25 является дискуссионным [Brozena, et al., 2003; Chernykh, et al., 2023; Gaina, et al., 2011]. Южнее, в направлении к морю Лаптевых, часть аномалий становится менее амплитудной, учащаются нарушения их непрерывности, и число линейных аномалий, уверенно прослеживаемых в направлении от осевой впадины, уменьшается до 7–8 (см. рис.1, северная часть). Еще южнее, современные аномалии сливаются с аномалиями 2С и в районе широты 82°N вовсе перестают прослеживаться в южном направлении. Примерно на этой же широте аномалии 5С, 6С, 8С (соответственно, с возрастом ~10, 20 и 25 млн лет) объединяются, и более древние перестают прослеживаться, таким образом, в южной части бассейна остается, по существу, две протяженные ЛМА (см. рис. 1).

В соответствии с принятой моделью, возраст фундамента Евразийского бассейна уменьшается от периферии бассейна к его осевой впадине, следовательно: 1) с расстоянием от осевой долины хребта Гаккеля увеличивается возраст поднятий и впадин фундамента, выделяемых на сейсмопрофилях, и 2) сейсмические горизонты, выделяемые в осадочном чехле, перестают прослеживаться в направлении к осевой долине в том месте, где возраст океанической коры соответствует времени формирования горизонта.

Но из второго пункта следует не только то, что возраст горизонта может быть определен по магнитохронам в месте исчезновения горизонта, но и наоборот — *если возраст участка океанической коры не удастся установить по ЛМА, то его можно определить по возрасту горизонта, который вблизи данного участка перестает прослеживаться в направлении к оси растяжения.* Необходимый для этого возраст горизонта может быть установлен с помощью сеймокорреляции из тех районов бассейна, для которых датировки горизонта известны.

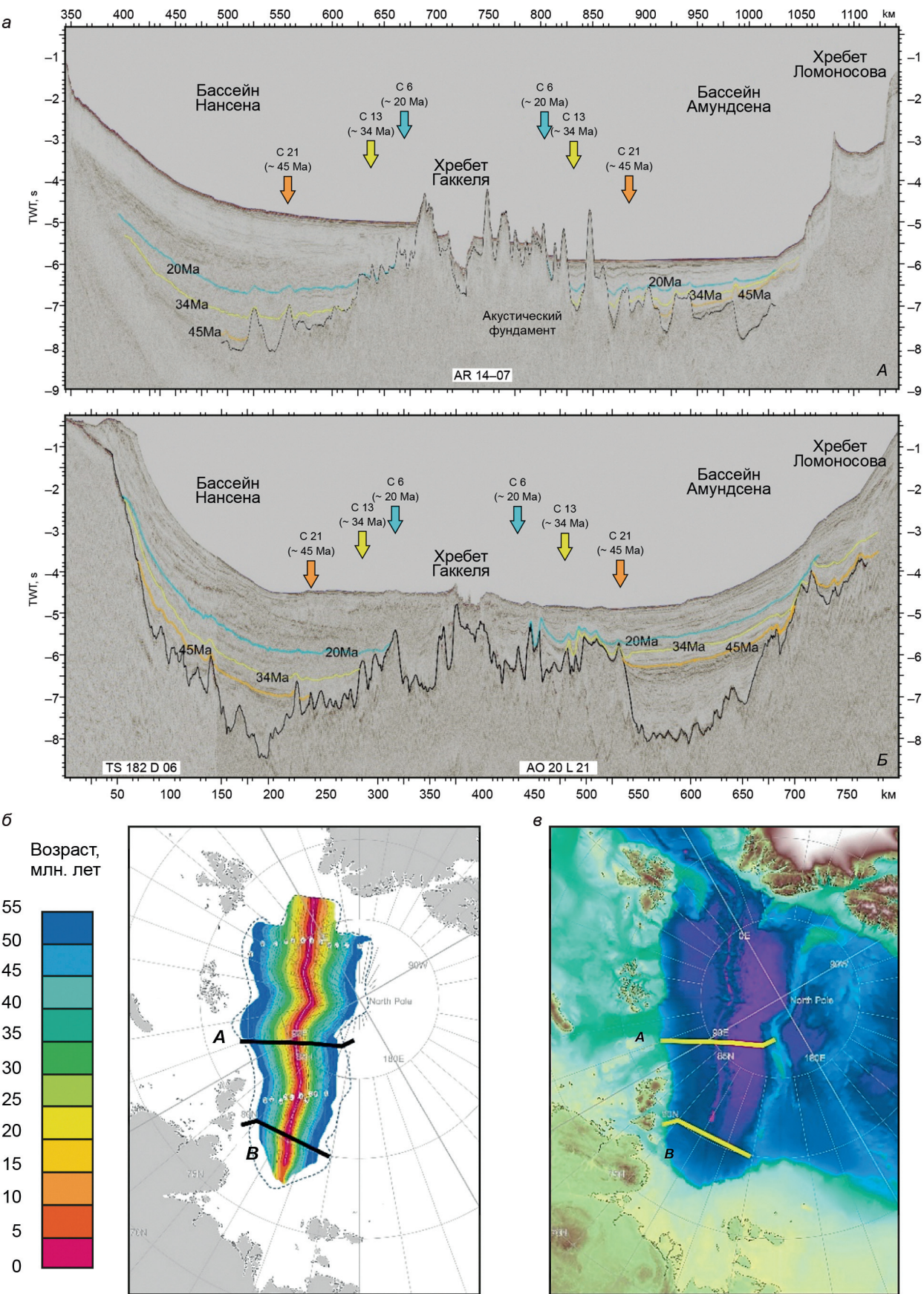


Рис. 3. Интерпретация сейсмических профилей, пересекающих Евразийский бассейн. Увязка сейсмических горизонтов с данными магниторазведки (а). Положение сейсмопрофилей на карте магнитохрон по данным [Chernykh, et al., 2023] (б) и на карте батиметрии (в)

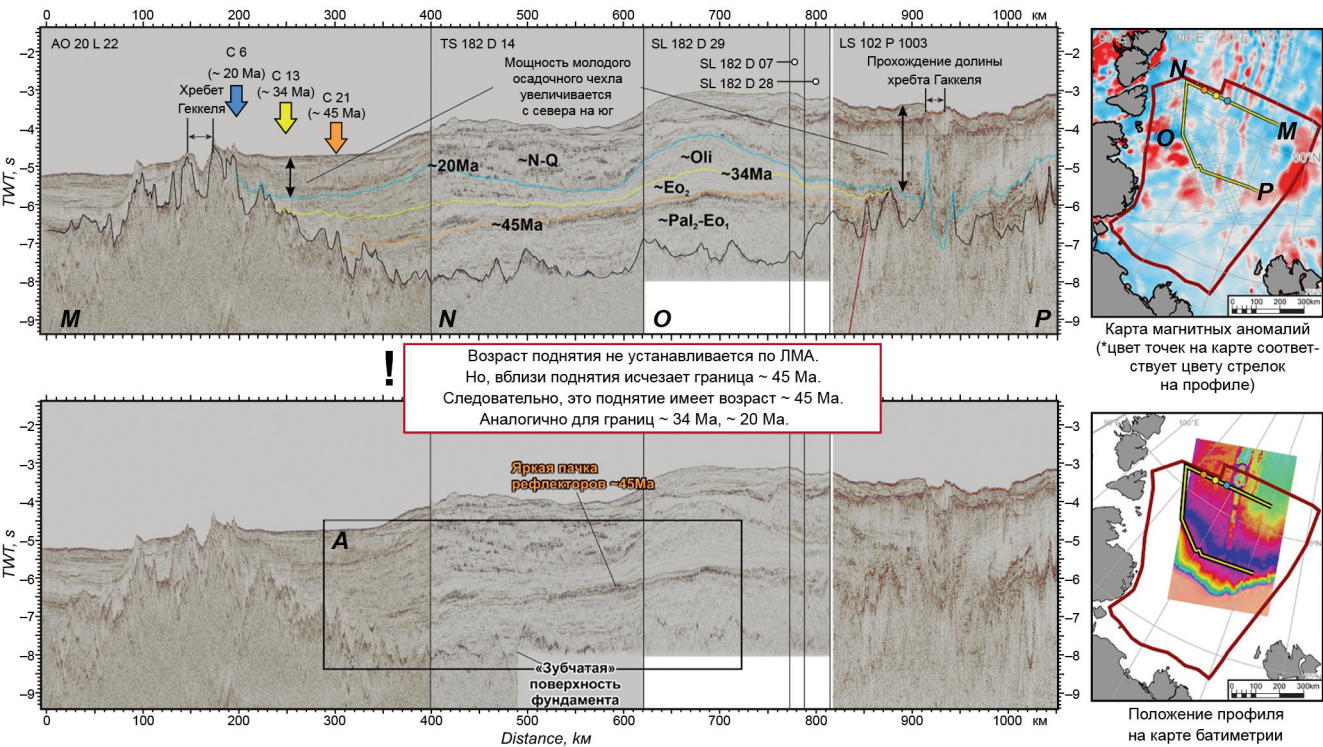


Рис. 4. Композитный профиль с непрерывной корреляцией осадочного чехла в бассейне Нансена с севера на юг. А — контуры рис. 5

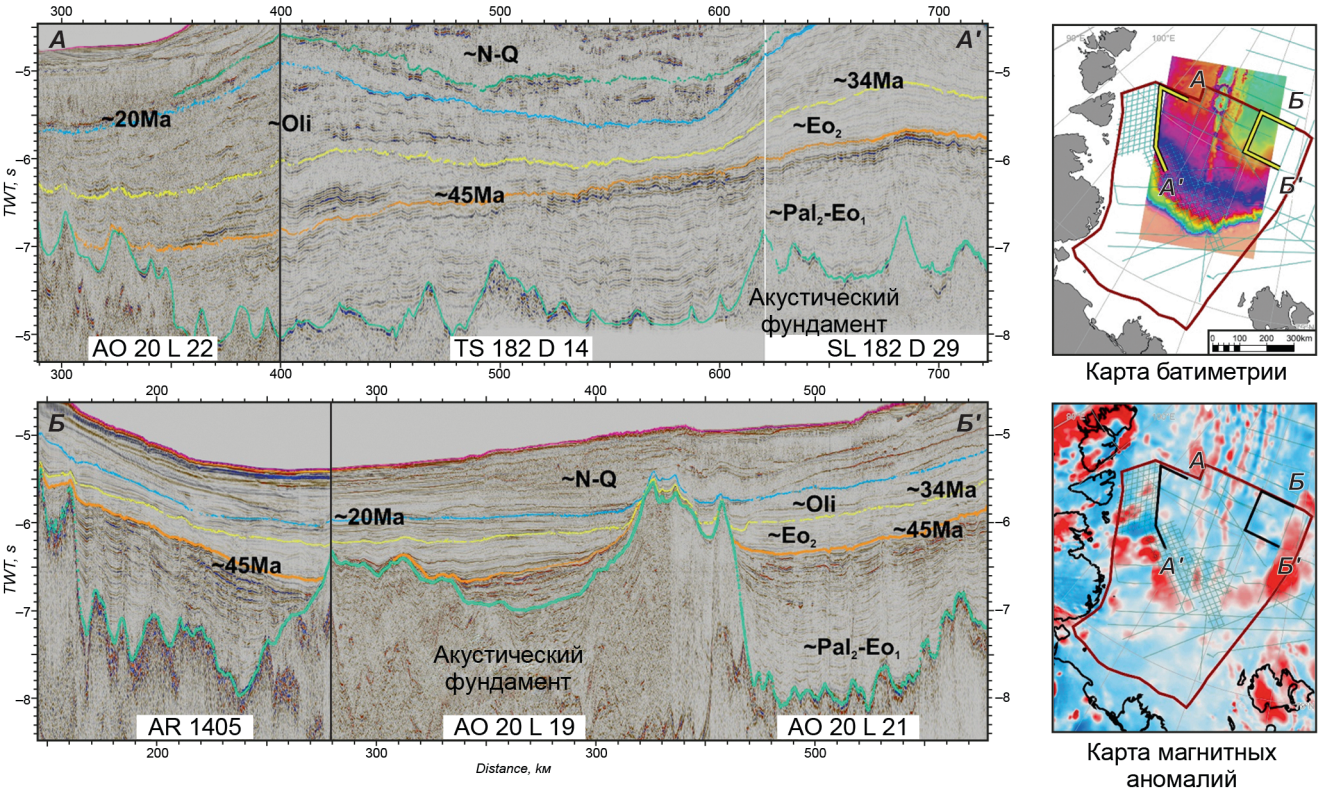


Рис. 5. Сравнение сейсмокомплексов, выделяемых в бассейне Нансена (АА') и Амундсена (ББ'). Вертикальный и горизонтальный масштабы одинаковые. Мощности осадочных пород в бассейне Нансена больше, чем в бассейне Амундсена

Основной границей, прослеживаемой на сеймопрофилях в пределах Евразийского бассейна, является поверхность акустического фундамента (рис. 3). Характерной его особенностью является изрезанный рельеф, который отделяет яркие, высокоамплитудные и в основном хаотические отражения

акустического фундамента от менее амплитудных, от акустически прозрачных до слоистых отражений осадочного чехла (рис. 4; 5).

Одним из наиболее характерных горизонтов в осадочном чехле Евразийского бассейна является граница ~45 млн лет [Nikishin, et al., 2021; Weigelt,

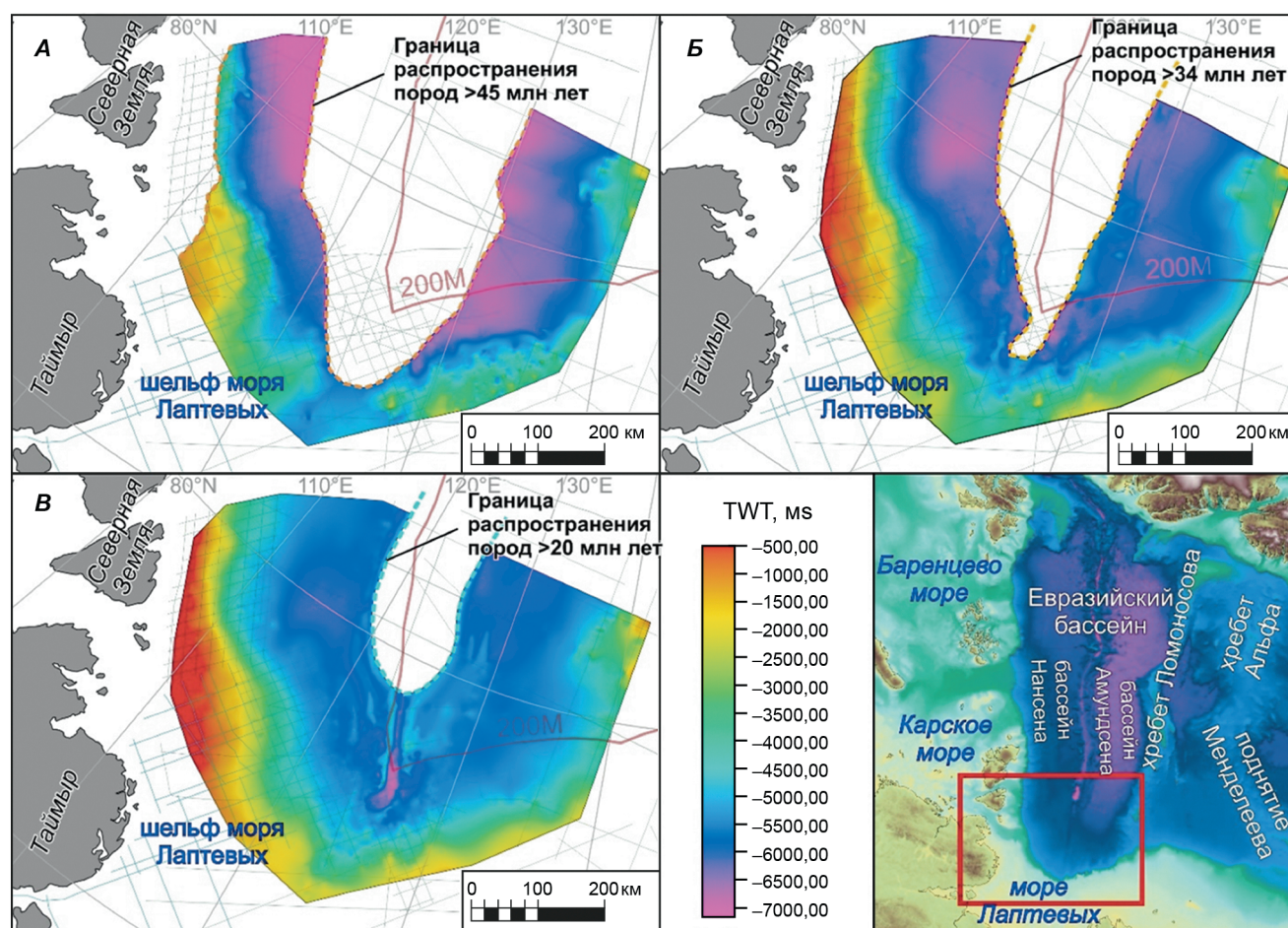


Рис. 6. Структурные карты в масштабе времени (TWT), построенные по результатам сейсмической корреляции горизонтов 45 млн лет (А), 34 млн лет (Б), 20 млн лет (В). 200М — граница двухсотмильной зоны. Цветовую легенду для карты батиметрии см. на рис. 1

et al., 2014; Никишин и др., 2022; Черных, Крылов, 2011]. Горизонт проходит в кровле пачки ярких рефлекторов, формирование которых относится к периоду климатического оптимума в Арктике 56–45 млн лет [Nikishin, et al., 2021; Stein, et al., 2015]. Возраст границы ~45 млн лет устанавливается по данным магнитостратиграфии и увязан с данными скважины ACEX [Backman, et al., 2008; Никишин и др., 2022; Черных, Крылов, 2011].

На большей части Евразийского бассейна в целом распространение пачки ярких рефлекторов ~45 млн лет по направлению к оси растяжения ограничено поднятиями в акустическом фундаменте, возраст которых по ЛМА также составляет ~45 млн лет (рис. 3; рис. 4 — левая часть). В направлении к морю Лаптевых, по данным сейсмикорреляции, эта пачка ярких рефлекторов продолжает прослеживаться (см. рис. 4, правая часть), и ее распространение также ограничено поднятиями в фундаменте. Различие состоит в том, что в прилаптевоморской части бассейна эти поднятия невозможно датировать по ЛМА, поскольку магнитные аномалии древнее 25 млн лет здесь не прослеживаются. Тем не менее, исходя из того, что вблизи этих поднятий пачка ярких рефлекторов ~45 млн лет исчезает, то, аналогично более север-

ным частям бассейна, возраст поднятий принимается также ~45 млн лет.

На сейсмопрофилях, показанных на рис. 1, были отмечены точки, в которых наблюдается прекращение распространения рефлекторов ~45 млн лет в направлении к осевой долине. Эти точки были соединены в плане (рис. 6, А). Таким образом, в первом приближении была построена граница распространения осадочных пород с возрастом ~45 млн лет, которая совпадает с границей океанической коры, сформировавшейся после ~45 млн лет назад. По результатам сейсмической корреляции, в Евразийском бассейне в направлении к шельфу моря Лаптевых наблюдается клиновидное сужение области отсутствия осадков с возрастом >45 млн лет.

Аналогичным образом были прослежены горизонты ~34 и ~20 млн лет (соответственно, рис. 6, Б и В), выделяемые в более северных частях Евразийского бассейна [Nikishin, et al., 2021; Weigelt, et al., 2014]. Для этих горизонтов так же, как и для границы ~45 млн лет, в прилаптевоморской части бассейна выявлены границы их распространения в направлении к оси растяжения бассейна.

Таким образом, в прилаптевоморской части Евразийского бассейна были установлены возраста некоторых выделяемых на сейсмопрофилях под-

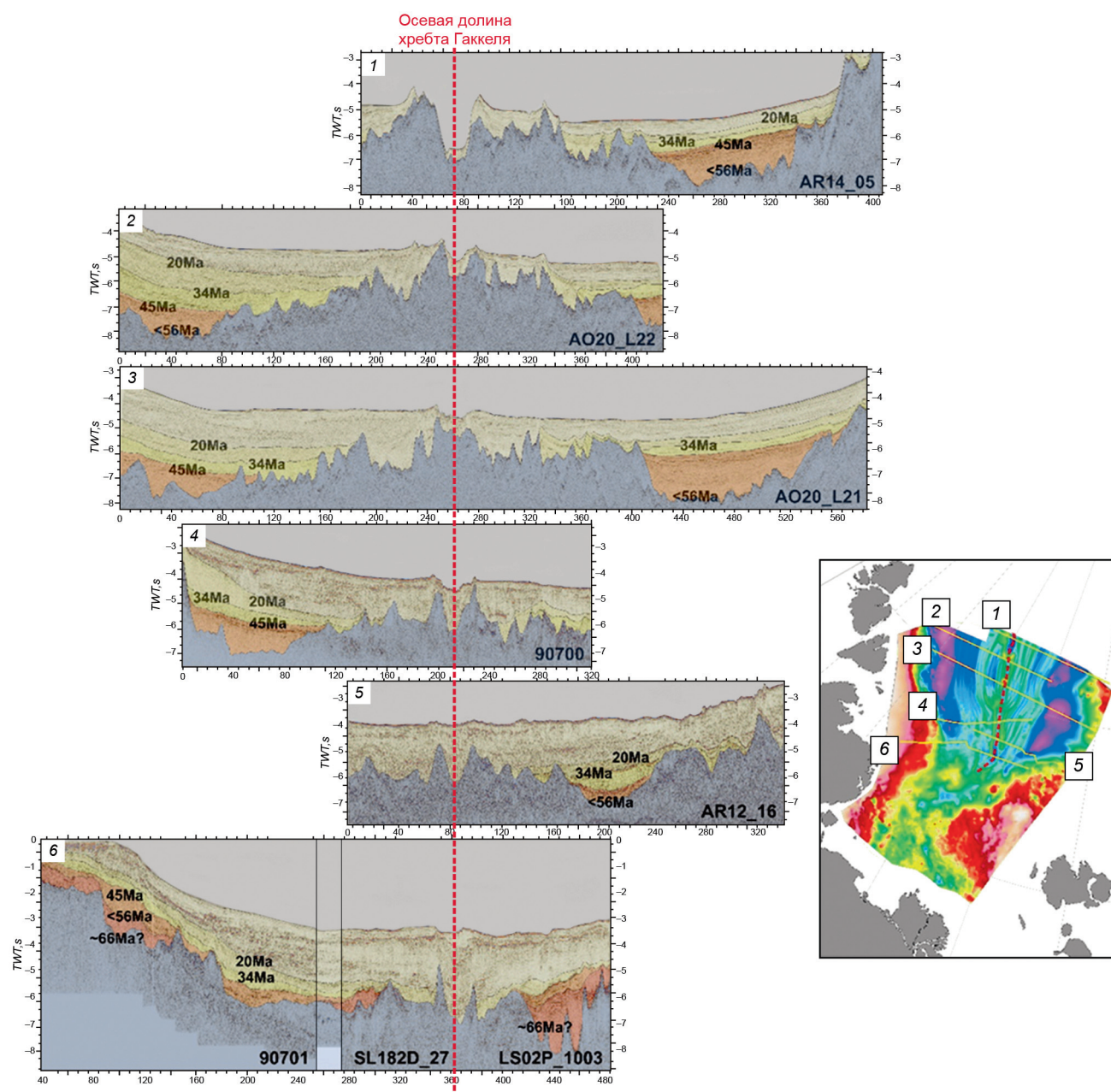


Рис. 7. Разрезы через хребет Гаккеля. На верхних трех разрезах видно, что спрединг океанической коры шел непрерывно до настоящего времени. Для нижних трех профилей показано, что осадки примерно моложе 20 млн лет перекрывают весь хребет Гаккеля. Из этого следует, что спрединг здесь прекратился около 20 Ма и он трансформировался в процесс сбросообразования в полосе бывшего океанического рифта. Описание карты-врезки см. на рис. 9

нятий акустического фундамента и границы распространения отложений с возрастом около 45, ~34 и ~20 млн лет. Но в Евразийском бассейне именно с поднятиями связано ограничение распространения отложений соответствующего возраста по направлению к современной впадине хребта Гаккеля. Эта взаимосвязь повторяется в сечениях вдоль всего простирания Евразийского бассейна (рис. 7). Следовательно, поднятия, скорее всего, имеют в плане вытянутую форму и простираются параллельно границам распространения отложений.

Результаты сейсмической интерпретации. В результате выполненной корреляции по всей имеющейся сети двухмерных профилей МОВ-ОГТ,

в строении прилаптевоморской части бассейна был выявлен ряд особенностей.

Во-первых, в южной части района исследований выделяется область, имеющая аномальное строение. Если в более северных частях Евразийского бассейна рифтовую долину перекрывают только современные осадки, то в аномальной зоне осевая часть бассейна перекрыта отложениями с возрастом около 20 млн лет (см. рис. 7). Это значит, что спрединг в этой части бассейна остановился не менее 20 млн лет назад.

Во-вторых, в области прекращения распространения осадков >45 млн лет наблюдается изменение геометрии фундамента — если фундамент древнее 45 млн лет имеет общую тенденцию к погружению

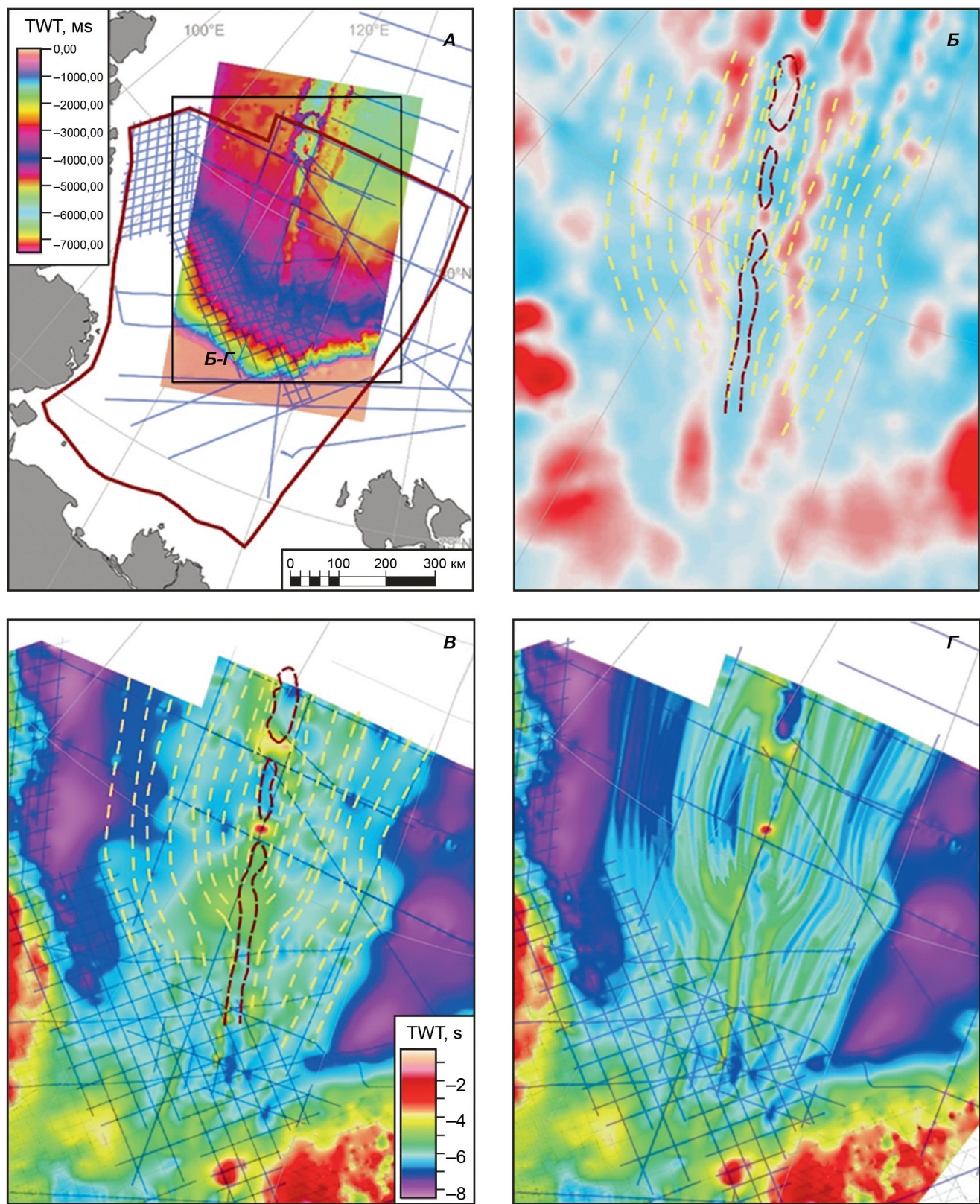


Рис. 8. Редактирование модели фундамента Евразийского бассейна, построенной по результатам корреляции имеющихся сейсмопрофилей (синие линии). А — детальная карта батиметрии, с которой были получены контуры рифтовой долины для экстраполяции модели фундамента (красный пунктир); Б — карта ЛМА; желтый пунктир — полигоны, соединяющие разновозрастные поднятия в фундаменте; В — фрагмент карты фундамента Евразийского бассейна (500×500м), построенной методом Гауссовой интерполяции до коррекции по данным батиметрии и без учета направляющих полигонов (желтый пунктир); Г — фрагмент карты фундамента, построенной с коррекцией по данным батиметрии и с учетом полигонов

в направлении к осевой части бассейна, то фундамент моложе 45 млн лет связан общим воздыманием в направлении к оси бассейна. Это связывается с переходом к ультрамедленному спредингу, который произошел около 45 млн лет назад.

Построение модели фундамента. Полученные результаты сейсмической корреляции по двумерным профилям МОВ-ОГТ (см. рис. 7), а также данные о распространении отложений с возрастом ~45, ~34 и ~20 млн лет (рис. 6) были использованы для построения 3D-модели акустического фундамента прилаптевоморской части Евразийского бассейна в масштабе времени двойного пробега сейсмических волн (Two-Way-Time, TWT). Для корректировки модели использовались данные детальной батиметрии в районе исследования и данные магниторазведки (рис. 8).

Первичная модель фундамента по данным сейсмкорреляции акустического фундамента была построена методом Гауссовой интерполяции. Разрешение модели было выбрано 500 × 500 м, поскольку поверхность с таким размером ячейки практически не отклоняется от горизонтов сейсмической корреляции на сеймопрофилях. На рис. 8, В видно, что разреженность сети сеймопрофилей не позволяет путем Гауссовой интерполяции между профилями отобразить в рельефе фундамента современную рифтовую долину и структуры, выявляемые по данным магнитометрии. Для того, чтобы учесть эти данные в модели фундамента, был проведен ряд дополнительных построений.

Во-первых, была произведена коррекция по данным батиметрии. Рельеф морского дна был пересчитан в масштаб времени двойного пробега сейсмических волн, с использованием скорости сейсмических волн в морской воде. После этого был построен контур рифтовой долины (рис. 8). Внутри этого контура была задана временная мощность (мощность в масштабе времени) осадочного чехла в рифтовой долине путем интерполяции данных 2D-сейсмкорреляции (рис. 7). Из рельефа дна в масштабе времени и временной мощности осадков между дном и акустическим фундаментом была рассчитана поверхность фундамента в масштабе времени внутри заданного контура.

Во-вторых, между сейсмическими профилями были проведены полигоны, соединяющие поднятия и, соответственно, впадины, для которых был установлен одинаковый возраст по данным магнитоили сейсмостратиграфии (рис. 9). В северной части района изучения полигоны проведены параллельно линейным магнитным аномалиям. Южнее, где, предположительно, аномалии разных возрастов сливаются или исчезают, полигоны проведены условно, параллельно границам распространения осадочных пород с возрастом ~45, ~34 и ~20 млн лет. Полигоны для поднятий древнее ~45 млн лет не проводились, поскольку корреляция горизонтов древнее 45 млн лет и моложе 56 млн лет не выполнялась.

Поверхность фундамента в области рифтовой долины и полигоны, соединяющие разновозрастные структуры, наряду с результатами 2D-сейсмической корреляции, были заданы для расчета поверхности акустического фундамента прилаптевоморской части хребта Гаккеля. В результате получилась модель, учитывающая и увязывающая данные сейсморазведки, магниторазведки и батиметрии. Кроме этих данных, также были использованы результаты сейсмической корреляции фундамента Усть-Ленского бассейна моря Лаптевых [Никишин и др., 2022].

Полученная модель не окончательная. В дальнейшем, по мере поступления новых данных сейсморазведки, она может быть значительно улучшена и уточнена. Тем не менее, она отражает ряд особенностей строения фундамента, которые было бы сложно выявить лишь по результатам двумерной корреляции. По простиранию практически всего района исследований в рельефе фундамента Евразийского бассейна выделяются следующие структурные элементы (рис. 10):

- Континентальные склоны, ограничивающие Евразийский бассейн со стороны Таймыра, арх. Северная Земля и поднятия Ломоносова. По результатам сейсмической интерпретации, на этих склонах предполагается развитие палеоценового предспредингового (pre-breakup) рифтинга. Эти склоны непрерывно переходят в Усть-Ленскую систему рифтовых впадин, которая также предположительно имеет палеоценовый возраст [Никишин и др., 2022].

- Погруженные впадины бассейнов Нансена и Амундсена с возрастом коры 56–45 млн лет. Глубина залегания фундамента от поверхности воды более 7 сек. Ширина каждой впадины в изучаемой области до 100–140 км.

- По резкой границе от них отделяется относительно приподнятые области 45–34 млн лет. Глубина залегания, в основном, 7–6 сек. Ширина каждой «ступени» в изучаемой части бассейнов Нансена и Амундсена — около 60–70 км.

- «Ступени» 34–20 млн лет. Глубина залегания до 6,5 сек. Ширина до 40 км.

- Область поднятий 20–0 млн лет. Глубина 6,5–5 сек. Ширина от современной долины — до 70 км. Выделяются вулканические постройки высотой до 2 сек.

Зная ширину участка океанической коры и приблизительное время, за которое он сформировался, можно оценить скорость раскрытия океанического бассейна на разных этапах его развития. Соответственно, по скорости раскрытия океанического бассейна в прилаптевоморской части Евразийского бассейна выделяются зоны: 1) нормального спрединга океанической коры 56–45 млн лет (полускорость около 9–12 мм/год, полная скорость — 18–24 мм/год), 2) начала ультрамедленного спрединга 45–34 млн лет (полная скорость около 10–12 мм/год), 3) ультра-ультрамедленного спрединга 34–20 (полная скорость менее 6 мм/год) и 4) ультрамедленного

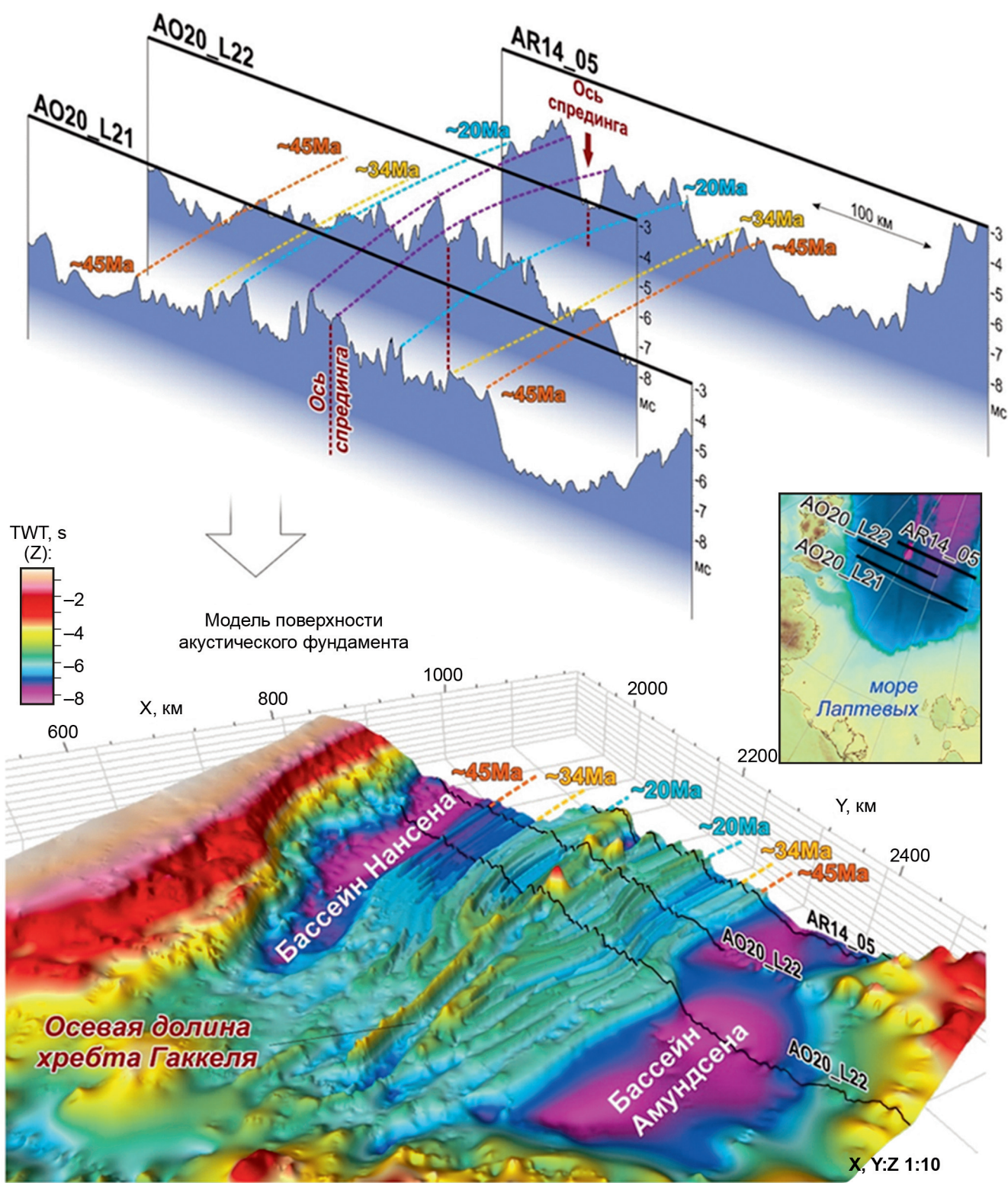


Рис. 9. Схематическая иллюстрация дополнительных построений для экстраполяции впадин и поднятий в фундаменте Евразийского бассейна. Пунктиром показаны некоторые направляющие полигоны, соединяющие разновозрастные структуры на сеймопрофилях

спрединга 20–0 млн лет с полной скоростью до 8 мм/год в северной части района исследований и с прекращением спрединга в южной его части.

Структурные особенности прилаптевоморской части Евразийского бассейна, выявленные в результате построения 3D-модели, были отражены

на тектонической схеме Евразийского бассейна (рис. 11) с помощью датировок возраста коры по ЛМА [Chernykh, et al., 2023]. Для построения схемы также использовались данные о магматизме Евразийского бассейна [Никишин и др., 2022; Родина и др., 2024].

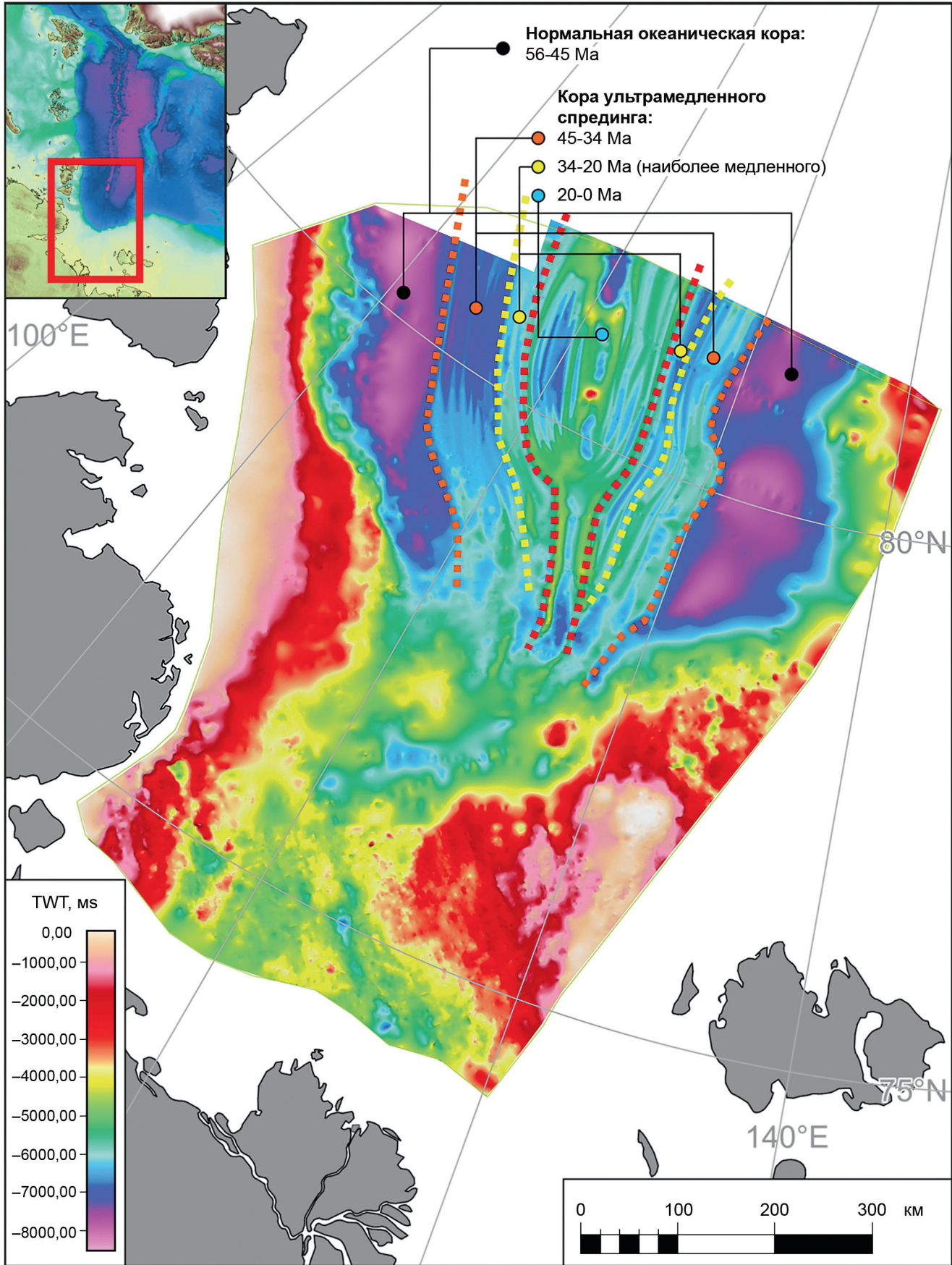


Рис. 10. Модель фундамента прилаптевоморской части Евразийского бассейна

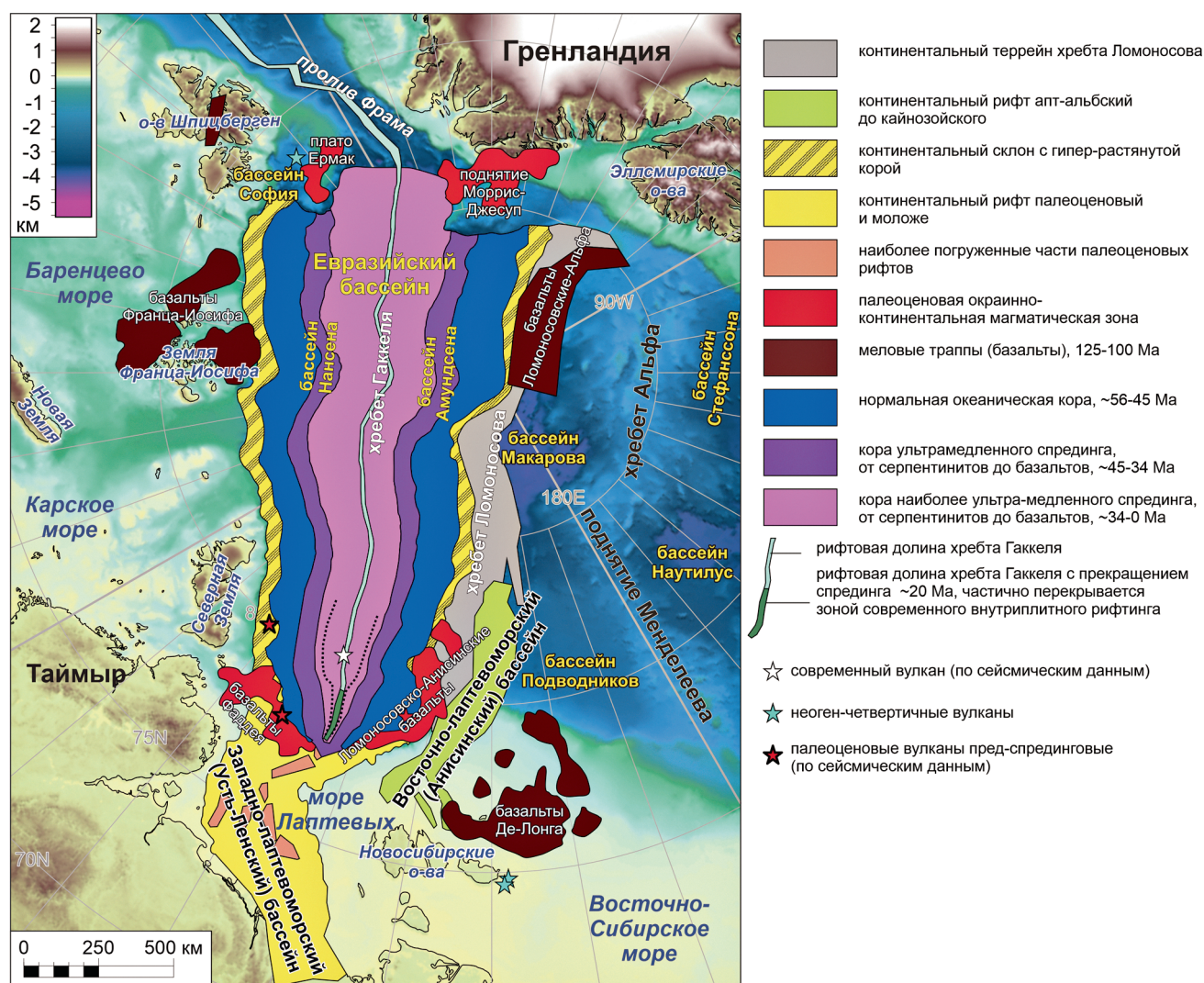


Рис. 11. Тектоническая схема Евразийского бассейна. Подложка — карта батиметрии по данным [Jakobsson, et al., 2020]. Магматические комплексы отмечены по данным [Никишин и др., 2022; Родина и др., 2024] и магнитных аномалий

Выводы. Предложена методика построения модели фундамента прилаптевоморской части Евразийского бассейна, объединяющая разнородные группы данных: 1) батиметрии; 2) сейсмические профили разных типов; 3) магнитное поле; 4) гравитационное поле; 5) анализ проб горных пород, драгированных на склонах хребта Гаккеля и его осевой рифтовой долины; 6) корреляцию имеющих скважин и сейсмических профилей; 7) изучение геологии островов и сопряженных континентов.

Геометрия акустического фундамента, выявленная с помощью построенной 3D-модели, отражает основные этапы развития Евразийского бассейна:

- 1) континентальный рифтинг до 56 млн л. н.,
- 2) «нормальный» спрединг 56–45 млн л. н.,
- 3) ультрамедленный спрединг 45–34 млн л. н.,
- 4) «ультра-ультрамедленный» спрединг 34–20 млн л. н.

Южная часть исследуемой области перекрыта осадочным чехлом с возрастом 20 млн лет и моложе, что связывается с прекращением спрединга здесь не

позднее 20 млн л. н. Для этой области мы не исключаем того, что спрединга океанической коры вообще не было, а было гипер-растяжение континентальной коры. Этот вопрос остается открытым.

Установление морфологии океанической коры Евразийского бассейна является промежуточной задачей, которую ставят себе авторы в рамках изучения уникальных обстановок современного ультрамедленного спрединга. Задачей дальнейших исследований является восстановление процессов, которые сформировали наблюдаемый облик бассейна, а также сравнение изучаемой области с другими спрединговыми бассейнами на Земле.

Благодарности. Авторы благодарны коллегам из ПАО «НК Роснефть», МГУ, ГИН РАН, ИМГРЭ, ВНИИОкеангеология, ВСЕГЕИ, СПбГУ за дискуссии по геологии Арктики. Рецензии С.Ю. Соколова, Е.П. Дубинина, А.А. Черных помогли существенно улучшить и дополнить исходную версию статьи.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Глебовский В.Ю., Черных А.А., Каминский В.Д. и др. Основные итоги и планы дальнейших магнитометрических и гравиметрических исследований в Северном Ледовитом океане // 70 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане / Под ред. В.Д. Каминского, Г.П. Аветисова, В.Л. Иванова. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2018. С. 196–208.
- Каминский В.Д., Чамов Н.П., Крылов А.А. и др. Первая находка аутигенных карбонатов на прилаптевоморском фланге хребта Гаккеля (Северный Ледовитый океан) // Доклады РАН. 2023. Т. 512. С. 219–224.
- Карасик А.М. Аномальное магнитное поле Евразийского бассейна Северного Ледовитого Океана // Доклады Академии наук СССР. 1973. Т. 211. С. 86–89.
- Никишин А.М., Петров Е.И., Старцева К.Ф. и др. Сейсмостратиграфия, палеогеография и палеотектоника Арктического глубоководного бассейна и его российских шельфов // Труды ГИН РАН, 2022. Т. 632. 156 с.
- Петров О.В., Никишин А.М., Петров Е.И. и др. Результаты стратиграфического бурения в Восточно-Сибирском море с целью геологического изучения зоны сочленения структур континентального шельфа и глубоководных акваторий Северного Ледовитого Океана // Доклады РАН. 2023. Т. 512. № 2. С. 261–271.
- Родина Е.А., Никишин А.М., Алёшина К.Ф. Проявления магматизма на При-Лаптевоморской части континентальной окраины Евразийского бассейна // Тектоника и Геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2024. Материалы LV Тектонического совещания. М., 2024. Т. 2. С. 127–131.
- Черных А.А., Крылов А.А. Седиментогенез в котловине Амундсена в свете геофизических данных и материалов бурения на хребте Ломоносова // Доклады РАН. 2011. Т. 440. С. 516–520.
- Backman J., Jakobsson M., Frank M., et al. Age model and core-seismic integration for the Cenozoic Arctic Coring Expedition sediments from the Lomonosov Ridge // Paleoceanography. 2008. V. 23.
- Bird K.J., Houseknecht D.W., Pitman J.K. Geology and Assessment of Undiscovered Oil and Gas Resources of the Hope Basin Province // Moore T.E., Gautier D.L. (Eds.), The 2008 Circum-Arctic Resource Appraisal. U.S. Geological Survey Professional Paper 1824, Reston, Virginia, 2017. P. 1–9.
- Brozena J.M., Childers V.A., Lawver L.A., et al. New aerogeophysical study of the Eurasia Basin and Lomonosov Ridge: Implications for basin development // Geology. 2003. V. 31. P. 825.
- Chernykh A.A., Yakovenko I. V., Korneva M.S., Glebovsky V.Y. Digital Models of the Deep Structure of the Earth's Crust in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // Geotectonics. 2023. V. 57. P. S34–S52.
- Funck T., Shimeld J., Salisbury M.H. Magmatic and rift-related features of the Lomonosov Ridge, and relationships to the continent–ocean transition zone in the Amundsen Basin, Arctic Ocean // Geophys. J. Int. 2022. V. 229. P. 1309–1337.
- Gaina C., Werner S.C., Saltus R., Maus S. Chapter 3 Circum-Arctic mapping project: new magnetic and gravity anomaly maps of the Arctic // Geol. Soc. London, Mem. 2011. V. 35. P. 39–48.
- Glebovsky V.Y., Kaminsky V.D., Minakov A.N., et al. Formation of the Eurasia Basin in the Arctic Ocean as inferred from geohistorical analysis of the anomalous magnetic field // Geotectonics. 2006. V. 40. P. 263–281.
- Jakobsson M., Mayer L.A., Bringsenparr C., et al. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0 // Sci. Data. 2020. V. 7. P. 176.
- Jokat W., O'Connor J., Hauff F., et al. Ultraslow Spreading and Volcanism at the Eastern End of Gakkel Ridge, Arctic Ocean // Geochemistry, Geophys. Geosystems. 2019. V. 20. P. 6033–6050.
- Jokat W., Schmidt-Aursch M.C. Geophysical characteristics of the ultraslow spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean // Geophys. J. Int. 2007. V. 168. P. 983–998.
- Lutz R., Franke D., Berglar K., et al. Evidence for mantle exhumation since the early evolution of the slow-spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean // J. Geodyn. 2018. V. 118. P. 154–165.
- Michael P.J., Langmuir C.H., Dick H.J.B., et al. Magmatic and amagmatic seafloor generation at the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean // Nature. 2003. V. 423. P. 956–961.
- Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S., et al. Arctic ocean mega project: Paper 2 — Arctic stratigraphy and regional tectonic structure // Earth-Science Rev. 2021. V. 217. P. 103581. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103581>
- Petrov O. V., Smelror M. (Eds.) Tectonics of the Arctic, Springer Geology // Springer International Publishing, Cham. 2021.
- Piskarev A., Poselov V., Kaminsky V. (Eds.) Geologic Structures of the Arctic Basin. Springer International Publishing, Cham. 2019.
- Sauter D., Cannat M., Rouméjon S., et al. Continuous exhumation of mantle-derived rocks at the Southwest Indian Ridge for 11 million years // Nat. Geosci. 2013. V. 6. P. 314–320.
- Stein R., Jokat W., Niessen F., Weigelt E. Exploring the long-term Cenozoic Arctic Ocean climate history: a challenge within the International Ocean Discovery Program (IODP) // Arktos. 2015. V. 1. P. 3.
- Theunissen T., Huismans R.S. Mantle exhumation at magma-poor rifted margins controlled by frictional shear zones // Nat. Commun. 2022. V. 13. P. 1634.
- 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. V. 119. P. 5275–5289.

Статья поступила в редакцию 10.05.2024,
одобрена после рецензирования 03.06.2024,
принята к публикации 18.08.2024