

## INTENSITY INDICATORS OF GEODYNAMIC PROCESSES ALONG THE ATLANTIC-ARCTIC RIFT SYSTEM

S.Yu. Sokolov<sup>1</sup>, N.P. Chamov<sup>1</sup>, M.D. Khutorskoy<sup>1</sup>, S.A. Silantiev<sup>2</sup><sup>1</sup> Geological Institute of RAS, Moscow, Russia<sup>2</sup> V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS, Moscow, Russia

**ABSTRACT.** Seismicity, heat flow, seismic tomography data, prerift and synrift magmatism are considered as intensity indicators of geodynamic processes along the Atlantic-Arctic rift system (AARS). In this rift system, several large (over 100 km) sub-latitudinal displacements of the rift axis are due to left-lateral strike-slip faulting. The AARS segments are distinguished by the age of splitting of continental plates from each other. A dependence is revealed between the current thermal state of the mantle under the AARS and the age of spreading start. This dependence is established from both seismic tomography and heat flow data. In section  $\delta(Vp/Vs)$ , the locations of the main segmenting faults and 'cold' anomalies in the upper mantle are coincident. Distributions of total seismic moments are practically synchronous in the depth intervals of 0–13, 13–35, and >35 km. The maximum values above the plumes are represented by higher seismic moments in the surface layer. The main demarcation zones differ in maximum energy release values in the AARS with shearing features. Comparison of these values against the age of the start of spreading processes shows trends of heat flow and medium field tomography in the AARS segments. The trends confirm the thermal interpretation of the seismic tomography data and suggest mantle cooling with age and a decrease in the mean temperatures of the mantle. The main factor causing the sublatitudinal asymmetry of heat flow in the AARS is the impact of Coriolis forces on the magma in the asthenospheric source. Most of the synrift igneous formations seem to be related to the influence of long-lived anomalies in the mantle, which had lower rates of magma generation than those typical of the formation of magmatic provinces. In conditions for spreading and the formation of the oceanic crust, the process followed the principle of energy cost minimization, and the prerift magmatic provinces with the pre-processed crust contributed to the choice and positioning of the AARS trajectory. The plume branches are imposed in the tomographic section and thus 'concealing' the relationship between the age and the thermal state. However, that does not change the trend to cooling of the mantle beneath the AARS, proportionally to the time since the start of spreading.

**KEYWORDS:** Atlantic-Arctic rift system; seismicity; seismic tomography; heat flow; magmatism; left-lateral strike-slip fault; transform fault; seismic moment; age of spreading

**FUNDING:** This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant 18-05-70040 – Evolution of the lithosphere of the Western Arctic: processes and mechanisms, development, natural resources and geological hazards). Funds for the heat flow data processing were provided by the RFBR (Grant 19-05-00014 – Geothermal asymmetry of divergent zones of the World Ocean) and the Presidium of the Russian Academy of Sciences (Project P49). The factors of potentially dangerous geological phenomena were analyzed under State Assignment No. 0135-2019-0076 – Dangerous geological processes in the World Ocean: connection with the geodynamic state of the crust and upper mantle and modern movements.

## RESEARCH ARTICLE

Received: May 6, 2019

Revised: July 1, 2019

Accepted: August 22, 2019

**FOR CITATION:** Sokolov S.Yu., Chamov N.P., Khutorskoy M.D., Silantiev S.A., 2020. Intensity indicators of geodynamic processes along the Atlantic-Arctic rift system. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (2), 302–319. doi:10.5800/GT-2020-11-2-0476

## ИНДИКАТОРЫ ИНТЕНСИВНОСТИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВДОЛЬ АТЛАНТИКО-АРКТИЧЕСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

С.Ю. Соколов<sup>1</sup>, Н.П. Чамов<sup>1</sup>, М.Д. Хуторской<sup>1</sup>, С.А. Силантьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Рассмотрены сейсмичность, тепловой поток, сейсмотомографический разрез, дорифтовый и синрифтовый магматизм как индикаторы интенсивности геодинамических процессов вдоль Атлантико-Арктической рифтовой системы (ААРС), имеющей несколько крупных (более 100 км) субширотных смещений оси рифта с левосдвиговой морфологией. Данные характеристики в сегментах ААРС, разграниченных по возрасту раскола континентальных плит, показывают, что существует зависимость современного термального состояния мантии под ААРС от возраста старта спрединговых процессов, выделяемая как по данным сейсмотомографии, так и по тепловому потоку. В разрезе  $\delta(Vp/Vs)$  основные сегментирующие разломы и «холодные» аномалии верхней мантии совпадают в пространстве. Распределение суммарного момента в интервалах глубин 0–13, 13–35 и >35 км практически синхронное. Максимумы над выходами плюмов представлены бóльшим моментом в поверхностном слое. Главные демаркационные зоны отличаются максимальным энерговыделением в ААРС с событиями сдвигового механизма. Полученные сопоставлением с возрастом старта спрединговых процессов тренды теплового потока и среднего уровня поля томографии по сегментам ААРС подтверждают правильность термальной интерпретации данных сейсмотомографии и показывают остывание с возрастом среднего показателя температуры мантии по обоим параметрам. Показано, что главным фактором, обуславливающим субширотную асимметрию теплового потока в ААРС, является действие силы Кориолиса на магматические массы в астеносферном очаге. Большинство синрифтовых магматических образований можно связать с действием долгоживущих аномалий в мантии, имеющих меньшие скорости магмогенерации, чем при формировании магматических провинций. При реализации условий для спрединга с образованием океанической коры процесс следует принципу минимизации энергетических затрат и дорифтовые магматические провинции с предварительно переработанной корой способствуют выбору и оформлению траектории ААРС. Наложение ветвей плюма в томографическом разрезе маскирует связь между возрастом и термальным состоянием, однако не отменяет тенденции к остыванию мантии под ААРС пропорционально времени с начала спрединга.

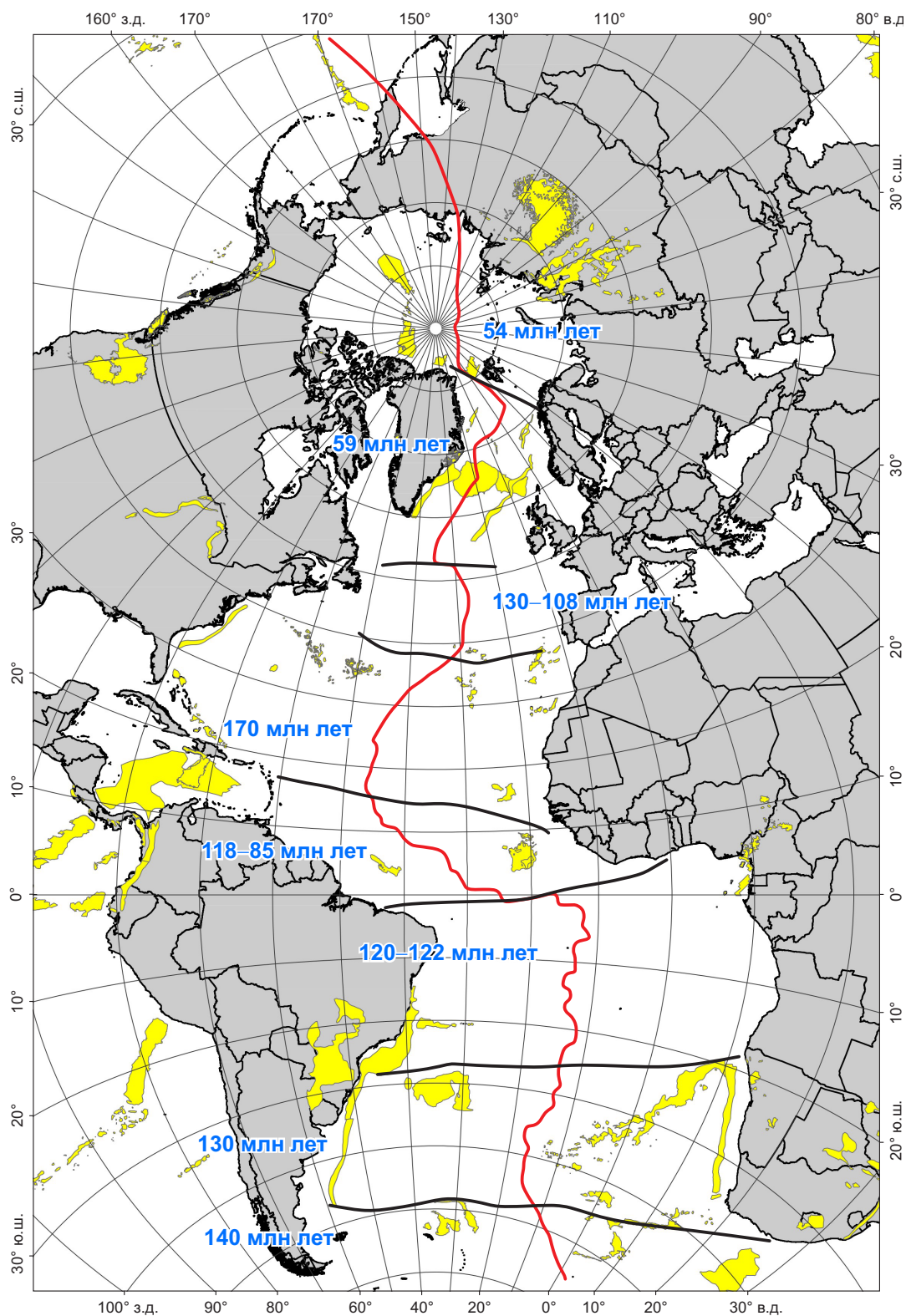
**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Атлантико-Арктическая рифтовая система; сейсмичность; сейсмотомография; тепловой поток; магматизм; левый сдвиг; трансформный разлом; сейсмический момент; возраст спрединга

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-05-70040 «Эволюция литосферы западной Арктики: процессы и механизмы, направленность развития, природные ресурсы и геологические опасности»); обработка данных теплового потока – РФФИ (проект № 19-05-00014 «Геотермическая асимметрия дивергентных зон Мирового океана») и Программы Президиума РАН П49; анализ факторов потенциально опасных геологических явлений выполнен по теме госзадания № 0135-2019-0076 «Опасные геологические процессы в Мировом океане: связь с геодинамическим состоянием коры и верхней мантии и новейшими движениями».

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Атлантико-Арктическая рифтовая система (ААРС) представляет собой крупнейшую структуру этого типа суммарной длиной не менее 18 тыс. км, включающую Срединно-Атлантический хребет (САХ) и хребет Гаккеля (рис. 1), являющийся осью раскрытия Евразийского арктического бассейна. Эта дивергентная структура сегментирована крупными демаркационными разломами. Возраст начала спрединговых процессов в разных сегментах ААРС колеблется от 170 млн лет в центральном, 59 млн лет в северном до 54 млн лет в арктическом сегменте системы (рис. 1). Общий возрастной тренд развития ААРС имеет направленность с юга на север через полюс и приводит к торцевому сочленению растущей зоны растяжения хребта Гаккеля с континентальным массивом Северо-Восточной Евразии

[Sokolov, 2017]. Фундаментальной гипотезой, объясняющей подобное протекание тектогенеза вдоль этой системы, является рифтогенез как отклик на дрейф плит, образующий в разное время и в разном месте пространство для развития спрединговых процессов и формирования океанических бассейнов. Анализ планетарных сил, задающих подобную геодинамическую конфигурацию, выходит за рамки данной работы, но возможным ее объяснением является ротационный фактор, подробно рассмотренный в работе [Sokolov, 2018]. В пользу такого подхода свидетельствует отсутствие сплошного потока прогретой восходящей от ядра мантии под осью ААРС по данным сейсмотомографии [Grand et al., 1997; Lebedev, Van Der Hilst, 2008; Van der Hilst et al., 1997]. Кроме этого, растяжение может охватывать прилегающие континентальные области



**Рис. 1.** Атлантико-Арктическая рифтовая система (ААРС), вдоль которой (красная линия) проведено сопоставление геолого-геофизических параметров (рис. 2), имеющих геодинамическую интерпретацию.

Черными линиями показаны демаркационные разломы, сегментирующие ААРС на блоки с разным возрастом начала спрединга (возраст указан цифрами). Большие магматические провинции (желтые поля) приведены по данным [Eldholm, Coffin, 2000].

**Fig. 1.** Atlantic-Arctic rift system (AARS), along which (red line) the geological and geophysical parameters with the geodynamic interpretation (Fig. 2) were analyzed.

Black lines show demarcation faults segmenting the AARS into blocks that differ in the age of spreading start (age is shown). Large magmatic provinces (yellow) after [Eldholm, Coffin, 2000].

с формированием неокеанических осадочных бассейнов на существующем фундаменте. При этом триггером запуска процессов рифтогенеза вдоль длинных сегментов ААРС, но не их причиной, может быть система локальных плюмов, формирующих зоны пониженной вязкости. Российский сегмент Арктики содержит два района, где имеет место взаимодействие рифта и плюма со структурным континентальным барьером, – море Лаптевых и архипелаг Земли Франца-Иосифа (ЗФИ). Задачей работы является анализ особенностей протекания геодинамических процессов вдоль ААРС и сопоставление их с разрезом атрибута отношения сейсмических скоростей  $V_p/V_s$  в мантии по данным сейсмограммы (рис. 2), имеющим геодинамическую интерпретацию подвижности среды [Sokolov, 2016].

Индикаторами геодинамической активности процессов вдоль оси ААРС, исследованными в настоящей работе, являются сейсмичность, тепловой поток, магматизм, а также некоторые петрологические характеристики базальтов. Разрез  $\delta(V_p/V_s)$  используется как единственный параметр для непрерывной геодинамической характеристики на всю глубину мантии, с которой проводится сопоставление этих индикаторов по разновозрастным сегментам. Целью настоящей работы является установление связи интенсивности индикаторов с возрастом сегментов, геометрией активной границы и проявлениями плюмов, а также с пространственным распределением досрединговых магматических провинций. Арктическая часть ААРС является небольшим ее звеном, но происходящие в ней процессы должны вписываться в общую логику развития всей рифтовой системы. Именно это определяет формат и пространственные границы объекта изучения.

## 2. РАЗРЕЗ $V_p/V_s$ И СЕГМЕНТАЦИЯ ААРС

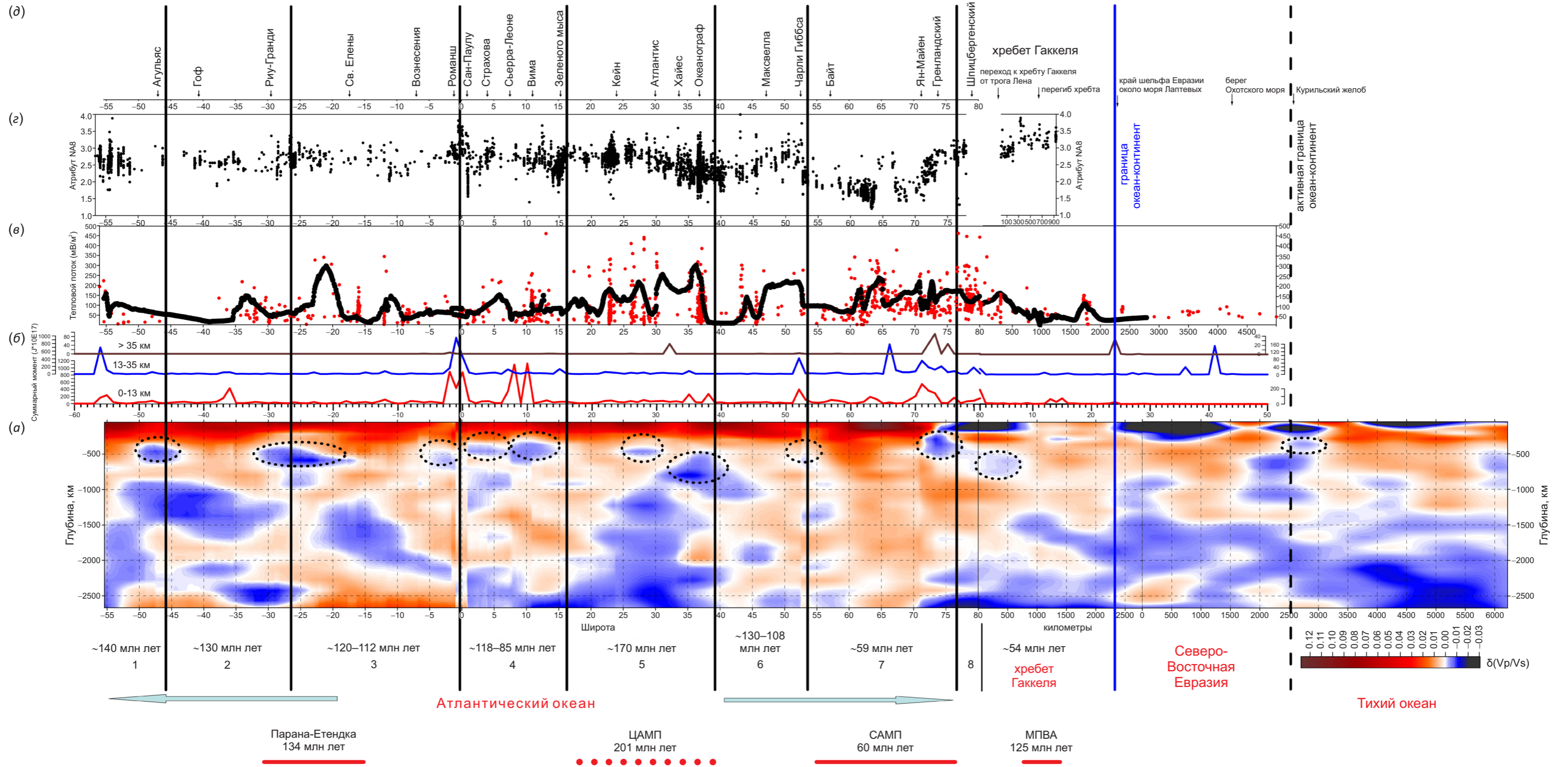
Разрез атрибута  $\delta(V_p/V_s)$  (рис. 2, а) простирается от тройного сочленения Буве на юге ( $55^\circ$  ю.ш.) через  $83^\circ$  с.ш. (западный край хребта Гаккеля), сочленения с Евразией в море Лаптевых и далее до Тихого океана. В этих пределах он был представлен в статье [Sokolov, 2017]. Траектория перехода ААРС через континент при выборе положения профиля не рассматривалась, поскольку основной акцент работы сделан на уже сформированную часть рифта в Арктике и Атлантике. Разрез  $\delta(V_p/V_s)$  (рис. 2, а) на большей части длины кроме Западной Арктики содержит интенсивную отрицательную аномалию от поверхности до глубины около 250 км. Конфигурация поля  $\delta(V_p/V_s)$  соответствует сечению плоскостью разреза ответвлений суперплюма, самым северным из которых является Исландский плюм. На разрезе атрибута обособляются «холодные» аномалии в интервале от 300 до 600 км в районе разломов Романш и экваториального сегмента, Чарли Гиббса и зоны хребта Книповича. Эти аномалии трактуются в рамках термальной интерпретации аномалий скоростей [Becker, Boschi, 2002] и соответствуют минимумам «подвижности». Сравнение положения этих зон с конфигурацией ААРС на плане (см. рис. 1) показывает соответствие

разломным демаркационным зонам, формирующим основную сегментацию Атлантического океана и его перехода к Арктике (рис. 2). Согласно работе [Sokolov, 2014], хребет Книповича вместе с трогом Лена также является демаркационной зоной, сегментирующей Северную Атлантику и Арктику. Атрибут подвижности  $\delta(V_p/V_s)$  (рис. 2, а) поделен на пронумерованные с юга на север сегменты, которые соответствуют демаркационным разломам.

Полярный сегмент разреза (рис. 2, а), проложенный от хребта Книповича на север через полярную область по хребту Гаккеля до Северо-Восточной Евразии, обладает иными характеристиками в поле атрибута  $\delta(V_p/V_s)$ . Нижняя мантия представлена в основном «холодными» значениями, и занимаемое ими пространство больше, чем в северной части САХ, поскольку отсутствуют пересечения ветвей суперплюма. В западной части хребта Гаккеля проявлена «холодная» аномалия, сходная с континентальной в Северо-Восточной Евразии. Подобный переход около отметки 900 км (рис. 2, а) от «холодного» состояния, не типичного для САХ, к более характерным «горячим» значениям сопровождается несколькими явлениями, почти совпадающими в пространстве, которые указывают на реальные изменения свойств литосферы вдоль разреза. Эти явления представлены: изменением ориентации хребта Гаккеля к востоку от  $65^\circ$  в.д., кластером аномальной сейсмичности 1999 г. на хребте около  $86^\circ$  в.д. [Lukina et al., 2004] в сочетании с контрастным минимумом изостатической аномалии [Zarayanskaya, 2013], постепенным переходом от амагматического характера строения дна с низким процентом поднятых базальтов к магматическому [Michael et al., 2003] около  $70^\circ$  в.д. Эти факты дополняют признаки поля  $\delta(V_p/V_s)$ , указывающие на большую «подвижность» сегмента хребта Гаккеля к востоку от отметки 900 км (рис. 2, а). На разрезе атрибута есть признаки ответвления от Исландского плюма на глубине около 1000 км, идущего на север и вдоль ААРС.

## 3. СЕЙСМИЧНОСТЬ ВДОЛЬ ААРС

Сейсмичность является одним из главных индикаторов геодинамической активности. ААРС, будучи дивергентной границей между несколькими плитами, представлена роем сейсмических событий, сконцентрированных в пределах осевой части и активных частей трансформных разломов, ее смещающих. По данным [Boldyrev, 1998] сейсмические события сбросового и сдвигового типа составляют примерно равную долю от общего числа событий. Взбросовые события также встречаются, но их число составляет первые проценты от общего количества. С.А. Болдырев при анализе распределения сейсмичности использовал суммарный сейсмический момент по одноградусным сегментам рифтовой системы за период наблюдений до 1995 года по  $m_b$  магнитудам. Было показано неравномерное распределение момента с максимумами около наибольшего субширотного смещения оси рифта в экваториальном сегменте Атлантики.



**Рис. 2.** Геолого-геофизические характеристики вдоль ААРС (положение профиля и демаркационных разломов приведено на рис. 1).

Вертикальными линиями разграничены блоки между демаркационными разломами с указанием времени начала спрединговых процессов и порядковым номером сегмента, имеющим описательный смысл. Горизонтальными линиями показано распространение доспрединговых магматических провинций с возрастом [Eldholm, Coffin, 2000]. Обозначения: ЦАМП – Центрально-Атлантическая магматическая провинция, САМП – Северо-Атлантическая магматическая провинция, МПВА – магматическая провинция Высокой Арктики. Пунктиром показана провинция, имеющая доспрединговые признаки только на западной континентальной окраине. (а) – разрез атрибута  $\delta(V_p/V_s)$  вдоль ААРС, рассчитанного по данным [Grand et al., 1997; Van der Hilst et al., 1997] по методике [Sokolov, 2014]. Разрез от 55° ю.ш. до 80° с.ш. показан в проекции на ось широт, далее через полюс разрез показан вдоль линии профиля с горизонтальной координатой, измеряемой в километрах. Пунктиром обведены области резкого усиления «холодных» аномалий на разрезе атрибута по сравнению с холодными аномалиями на исходном разрезе S-волн. (б) – суммарный сейсмический момент вдоль осевой зоны ААРС, рассчитанный по данным [ANSS, 2014] для всех типов магнитуд по методике [Boldyrev, 1998] для трех глубинных диапазонов: 0–13, 13–35 и >35 км. (в) – значения теплового потока вдоль ААРС по данным [Podgornykh, Khutorskoy, 1997; Global Heat..., 2018] (красные точки) и сечение грида, рассчитанного по этим данным методом кригинга, профилем ААРС (черные точки). (г) – значения петрологического атрибута Na(8) вдоль ААРС по данным [Dmitriev et al., 2000]. Значения атрибута для западной части хребта Гаккеля построены по [Michael et al., 2003]. (д) – сверху сборки характеристик подписаны названия основных разломов, пересекающих САХ, и морфологических районов, через которые проходит профиль.

**Fig. 2.** Geological and geophysical characteristics along the AARS (the profile location and the demarcation faults are shown in Fig. 1). Vertical lines – boundaries of blocks separated by demarcation faults (numbers – age of spreading start; the segments are numbered for description). Horizontal lines – pre-spreading magmatic provinces (numbers – age) [Eldholm, Coffin, 2000]. ЦАМП – Central Atlantic magmatic province, САМП – North Atlantic magmatic province, МПВА – High Arctic magmatic province. Dotted line – boundary of the province with pre-spreading indicators only at the western continental margin. (a) – section of attribute  $\delta(V_p/V_s)$  along the AARS, which is calculated by the method described in [Sokolov, 2014] using the data from [Grand et al., 1997; Van der Hilst et al., 1997]. The section from 55° S to 80° N is projected to the latitude axis, then across the pole the section is shown along the profile line with its horizontal coordinate (km). Dashed lines contour the areas with sharply increased ‘cold’ anomalies in the attribute section in comparison with ‘cold’ anomalies on the original section of S-waves. (b) – total seismic moments along the AARS axial zone, which are calculated from [ANSS, 2014] for all types of magnitudes according to the technique described in [Boldyrev, 1998] for the depth intervals of 0–13, 13–35, and >35 km. (c) – heat flow values along the AARSE after [Podgornykh, Khutorskoy, 1997; Global Heat..., 2018] (red dots), and the section of the grid (calculated from these data by kriging) with the AARS profile (black dots). (g) – values of petrological attribute Na(8) along the AARS after [Dmitriev et al., 2000]. The attribute values for the western part of the Gakkle ridge after [Michael et al., 2003]. (d) – top – names of the main faults across MAR and morphological regions crossed by the profile.

В настоящей работе использовалась база данных [ANSS, 2014] и суммирование момента сейсмических событий по 2012 год проводилось также по одноградусным сегментам по эмпирической формуле для Атлантики [Boldyrev, 1998]. Для расчета использовались все типы магнитуд, поскольку наиболее надежные определения  $m_w$  составляют около 10 % всех событий, но оценка в этом случае оказывается сильно заниженной. Расчет суммарного момента в соответствии с определяемыми и приписанными глубинами очагов был проведен по трем глубинным интервалам: 0–13, 13–35 и >35 км. Распределение событий вдоль ААРС носит крайне неоднородный характер вдоль своего протяжения (рис. 2, б), подтверждает и расширяет выводы, сделанные С.А. Болдыревым [Boldyrev, 1998].

Главные проявления сейсмической энергии отмечены в зонах с максимальным латеральным смещением ААРС (см. рис. 1): демаркационные разломы экваториального сегмента Атлантики – группа Романш и Сан-Паулу с юга и 15°20' с севера с общей амплитудой смещения около 3300 км; хребты Мона и Книповича между Арктикой и Северной Атлантикой с общей амплитудой смещения ААРС около 950 км; полиразломная система Чарли Гиббс с амплитудой смещения около 350 км. Остальное пространство ААРС представлено фоновыми значениями более чем на порядок меньше максимумов сдвиговых зон, в некоторых случаях

нарушаемых суммарным моментом событий в областях плюмов – Буве, Тристан-да-Кунья, Азорский, Исландский и центр хребта Гаккеля. Остальные суммарные значения в рифтовой системе, связанные с фоновым спрединговым магматизмом [Dmitriev, Sokolov, 2003], несущественны.

Распределение суммарного сейсмического момента показывает, что главная геодинамическая активность ААРС сосредоточена практически в точечных зонах – либо сдвиговых, либо плюмовых, а ~90 % длины ААРС содержит эпицентры слабых сейсмических событий, связанных со спрединговыми процессами. Большая часть базальтов, вылавившихся вдоль ААРС, относится к так называемой спрединговой ассоциации TOP-2 [Dmitriev, Sokolov, 2003], которая обладает наименьшими температурой и глубиной отделения расплава. Совмещение в пространстве этого типа магматизма со слабой сейсмичностью показывает, что фоновый процесс аккреции коры в ААРС не производит сильного выделения энергии. Эта закономерность нарушается в местах, где на структуры ААРС накладываются ветви суперплюмов (рис. 2, а) и ось рифта имеет большое (>100 км) латеральное смещение. Максимальное энерговыделение, таким образом, происходит в геодинамических обстановках, не связанных с генерацией новой коры при расхождении плит от протяженной дивергентной границы.

На врезках рис. 3 приведены гистограммы сейсмических событий вдоль ААРС по магнитудам в обычном и кумулятивном виде. 75 % всех событий, составляющих основной сейсмический процесс, приходится на магнитуды до 4.8. С.А. Болдырев [Boldyrev, 1998] использовал для расчета моментов эмпирическую зависимость  $lgM_0 = 17.1 + 1.3(m_b - 5.0)$ , в которой пороговым значением для расчета показателя является 5. Сравнение момента для событий с магнитудой 4 показывает, что разница в значении момента составляет 20 раз. Также С.А. Болдырев отмечает, что картина распределения момента меняет характер для событий с магнитудами выше 6. События с магнитудами 6.1 и выше на врезках отделены красной линией. Соответствующие им положения эпицентров на ААРС выделены красными кружками (рис. 3). Они ожидаемо совпадают с зонами максимумов суммарного сейсмического момента (см. рис. 2, б), относящимися к большим смещениям ААРС, и ее суперпозицией с ветвями плюмов.

#### 4. ИНВЕРСИИ СКОРОСТЕЙ СПРЕДИНГА В ОБЛАСТИ МАКСИМУМОВ СЕЙСМИЧНОСТИ

Существует необычная геодинамическая особенность в области разломов с максимумами суммарного сейсмического момента. В районе 55° ю.ш. (система разломов южного обрамления плюма Буве) и 52° с.ш. (полиразломная система Чарли Гиббс) при общем асимметричном преобладании значений полускоростей спрединга на западном фланге ААРС (западный дрейф) наблюдаются зоны инверсий (рис. 4), обведенные желтыми эллипсами. В этих зонах значения полускоростей восточного фланга ААРС преобладают над западными к югу от трансформных разломов. В случае системы Чарли Гиббс, имеющей левостороннюю морфологию, такая разница усиливает латеральное расхождение сегментов ААРС. Это должно сопровождаться усилением сколовых напряжений и повышенным сейсмическим фоном по сравнению с другими сегментами ААРС, где таких инверсий не наблюдается. Для анализа профилей полускоростей была выбрана изохрона 4 млн лет, поскольку она имеет достаточную возрастную разницу с нулевым осевым возрастом, чтобы расчет скорости по линейным аномалиям был осуществлен на большой базе, но при этом быть внутри плиоцен-четвертичного временного отрезка, в пределах которого сохраняется унаследованность кинематики плит.

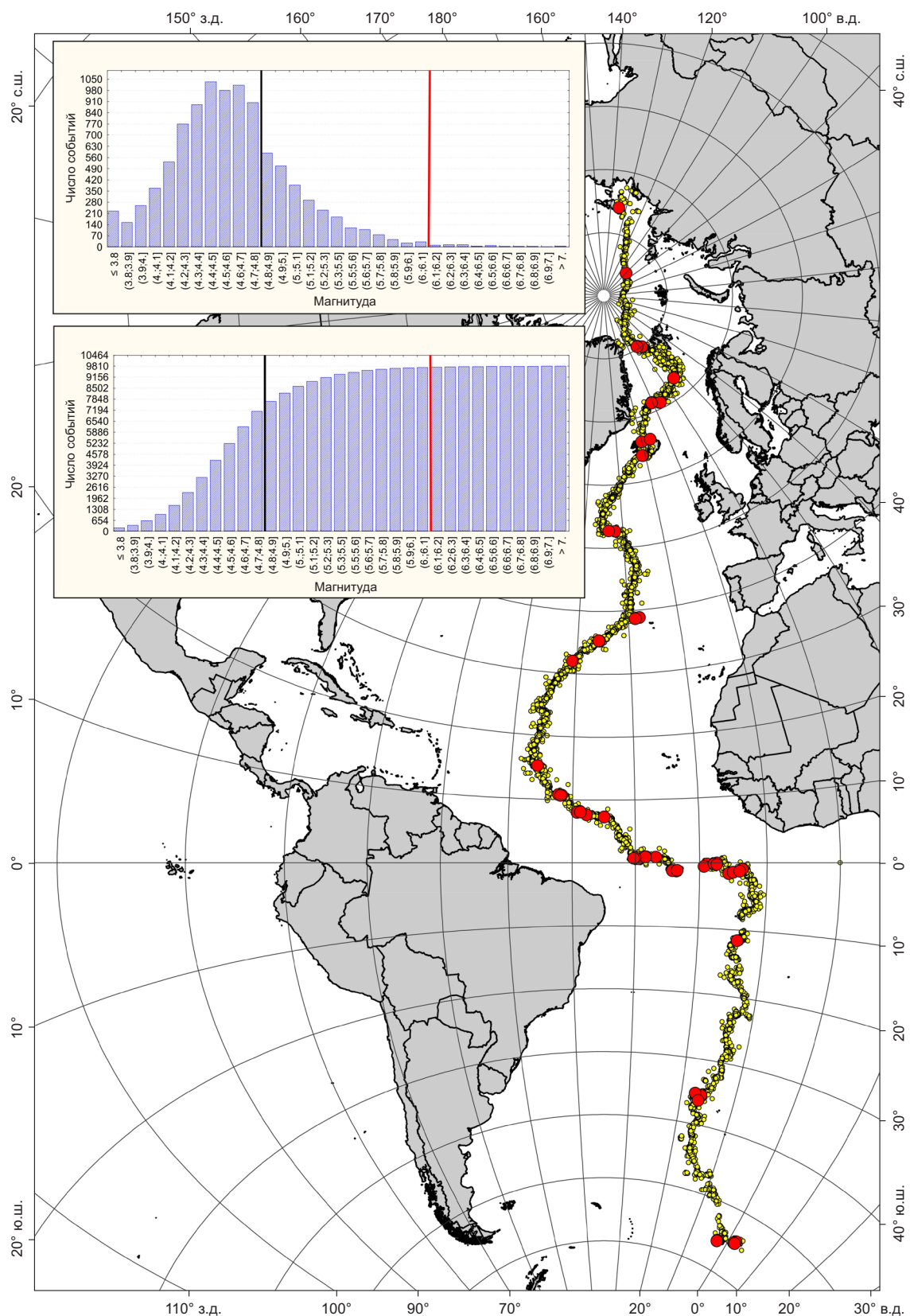
Экваториальный сегмент от 8° ю.ш. до 15° с.ш. из-за низкой надежности магнитных данных и сильных пиковых значений, полученных при интерполяции данных в условиях длинных разломных смещений, удален из рассмотрения. Другим сегментом, где проявлен упомянутый тип инверсии (рис. 4), является система разломов, ограничивающих выход ветви плюма Буве на поверхность, но в случае тройной точки аналогичная кинематическая интерпретация вряд ли применима. Отметим также инверсию в районе 20° с.ш., которой в структуре ААРС не соответствует никакой трансформный разлом. Данный сегмент характерен тем, что в нем

проявлены нетрансформные смещения, которые возникают при вдольосевом перетекании прогретого вещества [Aplonov, Trunin, 1995]. По всей видимости, при этих условиях формируется возможность для преобладания скоростей восточного фланга срединного хребта. Усложненная морфология сочленения хребта Гаккеля с Северо-Восточной Евразией [Piskarev et al., 2016; рис. 1.6.3], имеющая левосторонние элементы, является еще одним объектом в цепочке больших смещений вдоль ААРС, но сопоставить ее со скоростями спрединга по магнитным аномалиям невозможно из-за нехватки данных.

#### 5. ТЕПЛОВОЙ ПОТОК ВДОЛЬ ААРС

Тепловой поток (ТП) является параметром, отражающим геодинамическое состояние недр и степень термальной неравновесности их состояния. Из этого следует прямая целесообразность его сопоставления с данными томографии вдоль активной дивергентной границы ААРС и с возрастом. Для этой процедуры были использованы глобальные базы данных по тепловому потоку [Podgornykh, Khutorskoy, 1997; Global Heat..., 2018], показанные для зоны ААРС (см. рис. 2, в, красные точки), в полосе 200 км. В рифтовых впадинах вдоль осей хребтов обнаружены аномально высокие, «нулевые» и даже отрицательные значения плотности кондуктивного ТП. Поскольку спрединг океанического дна сопровождается внедрением мантийного материала, наблюдаемый здесь ТП формируется не только кондуктивным, но и конвективным выносом тепла вулканизмом и гидротермальными циркуляционными системами, возникающими в рифтовых впадинах. В данной работе мы не учитывали измерения ТП, полученные в областях гидротермальной разгрузки. Большинство таких измерений имеют значения более 1 Вт/м<sup>2</sup> и неадекватно отражают теплотери за счет кондуктивной теплопроводности. Для полосы САХ в пределах пятой идентифицированной магнитной аномалии экстремальные значения ТП, отражающие кондуктивный вынос тепла через рыхлые донные осадки, составляют первые сотни мВт/м<sup>2</sup>. Средние же величины полных теплотерь, рассчитанные как сумма кондуктивного и конвективного компонентов, в разных отрезках океанических хребтов находятся в диапазоне 400–700 мВт/м<sup>2</sup> [Foster et al., 1974; Popova et al., 1984; и др.]. Примерно те же цифры дали подсчеты общих теплотерь в рифтовых зонах Исландии с учетом масштабов разгрузки гидротерм [Polyak et al., 1984].

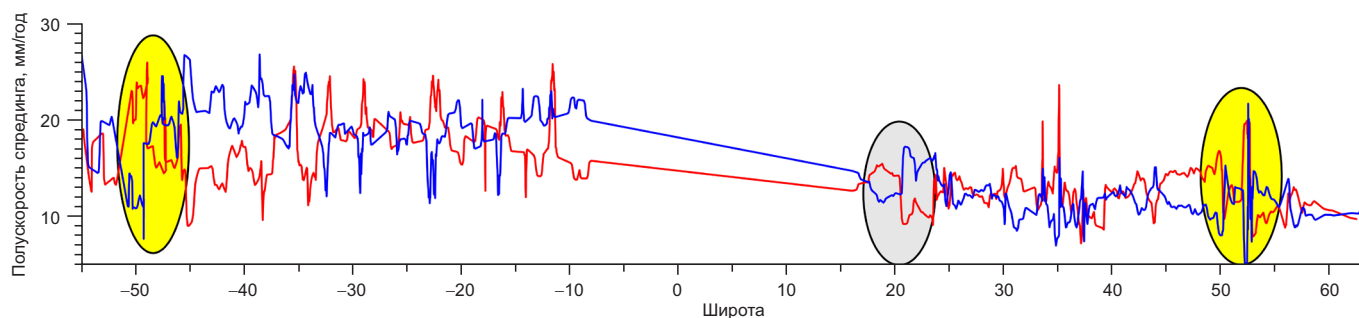
Если сконцентрировать суммарный поток тепла в узкой осевой зоне магматического резервуара диаметром порядка 10 км, в которую «сливается» магма из более широкой 100-километровой области астеносферы благодаря центростремительной горизонтальной составляющей фильтрации (этим, кстати, можно объяснить отсутствие сплошной линии вулканизма вдоль оси ААРС), то полный тепловой поток в рифтовой зоне примерно будет соответствовать тем «ураганным» его значениям, которые получены в Калифорнийском



**Рис. 3.** Эпицентры землетрясений по данным [ANSS, 2014] вдоль Атлантико-Арктической рифтовой системы (ААРС). Красные кружки – события с магнитудой более 6.1. На врезках показаны гистограммы распределения событий в обычном и кумулятивном виде. Черной линией на врезках показаны значения для 75 % событий, красной линией – магнитуды 6.1.

**Fig. 3.** Earthquake epicenters (after [ANSS, 2014]) along the Atlantic-Arctic rift system (AARS). Red circles – earthquakes ( $M > 6.1$ ). Insets show histograms of the distribution of seismic events in the general and cumulative form; black lines – values for 75 % events; red lines – magnitudes 6.1.





**Рис. 4.** Значения полускоростей спрединга (мм/год) по данным [Müller et al., 2008] вдоль изохроны 4 млн лет, показанные парами для западного (синяя линия) и восточного (красная линия) флангов САХ с удаленным интервалом от 8° ю.ш. до 15° с.ш. из-за низкой надежности магнитных данных. Эллипсами показаны обсуждаемые в тексте инверсии полускоростей.

**Fig. 4.** Half-values of spreading rates (mm/year) after [Müller et al., 2008] along 4 Ma, which are shown in pairs for the MAR western and eastern flanks (blue and red lines, respectively). Remote interval from 8° S to 15° N due to the low reliability of magnetic data. Ellipses – half-value inversions discussed in the text.

заливе и Красном море. На флангах трансформных разломов и близлежащих рифтовых сегментов [Khutorskoi, Polyak, 2017] величины кондуктивного теплопотока достаточно однородны – от 70 до 120 мВт/м<sup>2</sup> и в первом приближении зависят от возраста второго слоя океанической коры. Кондуктивный тепловой поток в активных частях трансформных разломов между фрагментами САХ адекватен полному выносу энергии в осевых зонах рифтов.

Детальные исследования ТП в пределах склонов срединно-океанических хребтов и смежных абиссальных котловин показали (рис. 5), что его распределение не во всех сегментах является симметричным относительно оси хребта в соответствующих однотипных зонах, а подчинено сложному механизму перераспределения, зависящему от многих геологических причин, связанных с тектоникой и особенностями строения литосферы этих зон, а также от планетарных процессов, например от воздействия силы Кориолиса, перемещающей магматическое вещество в астеносферном резервуаре к востоку от оси рифта в Северном полушарии и к западу – в Южном [Khutorskoy, Teveleva, 2018].

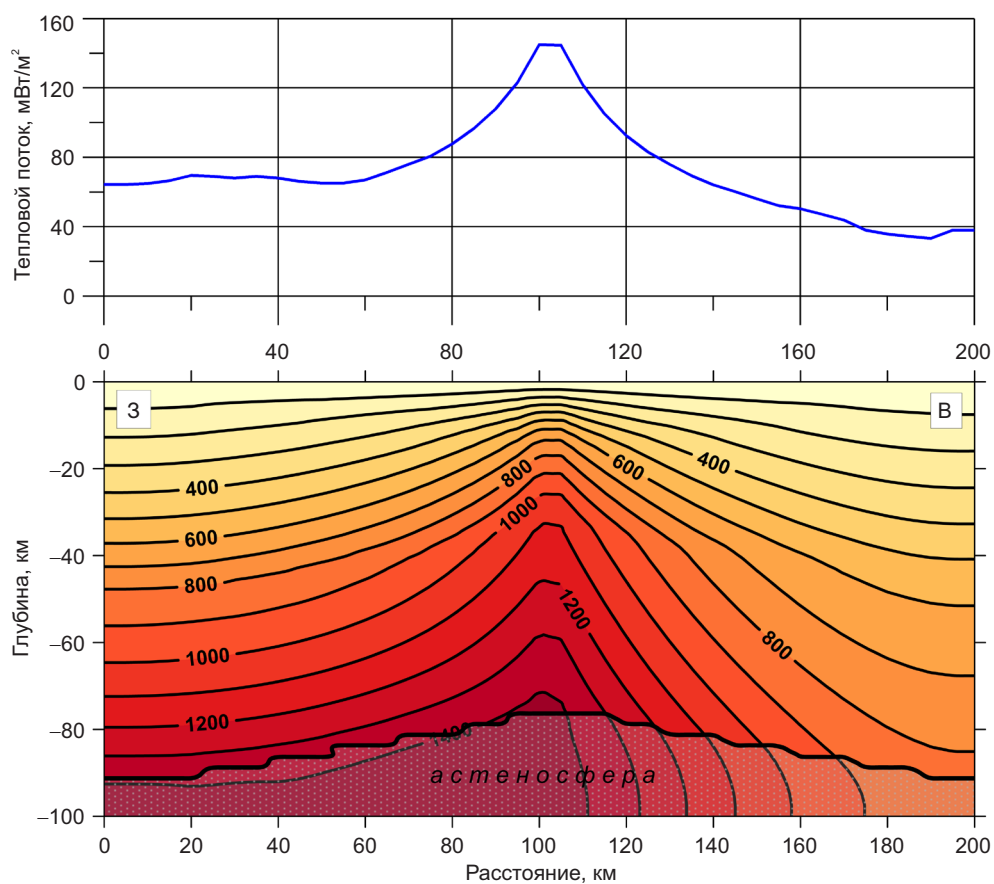
Для анализа теплового потока в непрерывном режиме вдоль протяжения ААРС неравномерно распределенное облако точек промеров было проинтерполировано на грид с равномерным шагом 1 дуговой градус. По этому гриду с помощью профиля ААРС было сделано сечение, которое показано на рис. 2, в, черной линией. Сравнение с термическим состоянием мантии по данным томографии (см. рис. 2, а) показывает сложное мозаичное распределение ТП вдоль осевой зоны, но общий тренд на увеличение значений над выходами ветвей мантийных плюмов является очевидным. Поскольку сегментация ААРС была проведена исходя из возраста старта спрединговых процессов и на качественном уровне выше был показан тренд на снижение термического состояния с возрастом, эволюция этого состояния вдоль ААРС рассмотрена путем сопоставления со средними значениями ТП в пределах разновозрастных

сегментов. На рис. 6 показан тренд затухания ТП с возрастом. Сегменты 5 и 6 имеют отскоки, которые интерпретируются как отражение влияния Азорской «горячей точки» на фоновую термическую эволюцию. Исландский мантийный плюм, несомненно, также накладывается на фоновый термический режим ААРС, но из-за молодого возраста этого сегмента хребта его дополнительный термический эффект до сих пор не проявился в полной мере. Хребет Гаккеля характеризуется пониженными значениями ТП, но его слабая геотермическая изученность не позволяет уверенно интерпретировать тепловое поле в связи с сегментацией ААРС.

Таким образом, термическая эволюция вдоль ААРС в зависимости от возраста второго слоя океанической коры подчиняется сходной тенденции, что и эволюция вкрест простиранья рифтовой системы, – закону Склейтера-Сорохтина [Sorokhtin, 1974]. Сходство заключается в постепенном остывании мантии под осью ААРС после старта дрейфа плит по мере освобождения пространства для спрединговой аккреции. Полученная кривая показывает отсутствие постоянной подпитки области рифтовой системы прогретым веществом или ее «асимметричную подпитку», обусловленную влиянием планетарных факторов.

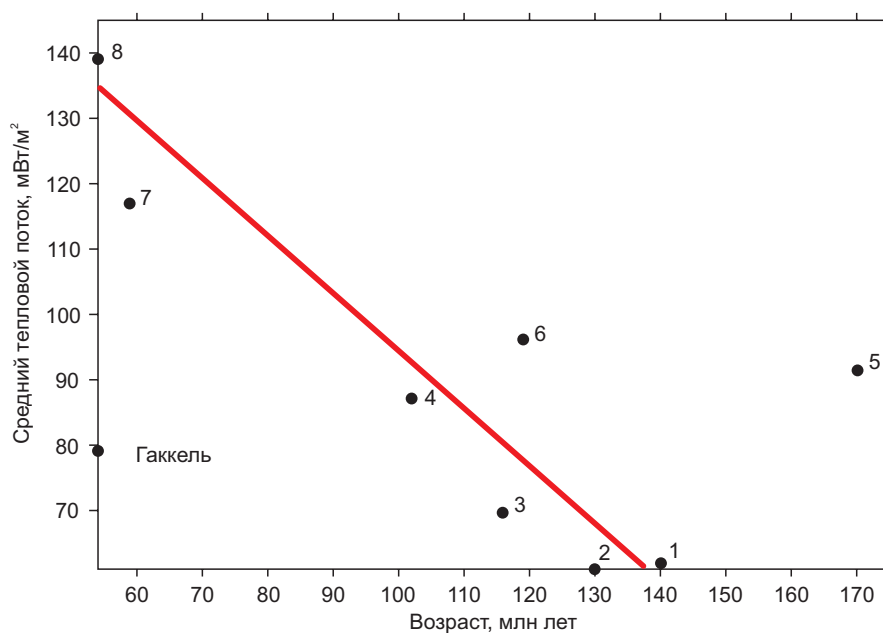
## 6. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТРИБУТА Na(8)

Проведенный анализ поля атрибута  $\delta(V_p/V_s)$  показал, что ветви плюмов с сильными «горячими» аномалиями накладываются и маскируют фоновое состояние мантии, выраженное в менее контрастных вариациях сейсмических скоростей. Отличительной особенностью плюмового магматизма является низкое значение атрибута Na(8) [Klein, Langmuir, 1987], рассчитываемого по содержанию Na и Mg в закалочных стеклах, по составу близких к родительскому расплаву MORB, и обратно пропорционального продуктивности магматизма. Таким образом, минимумы этого атрибута дополнительно показывают зоны суперпозиции ААРС с плюмами, а также сегменты, где формируется маскировка фонового



**Рис. 5.** Асимметрия геотемпературного поля,  $T, ^\circ\text{C}$  (внизу), и теплового потока (вверху) вкrest простираения срединно-океанического хребта (пример для Южного полушария Земли).

**Fig. 5.** Asymmetry of geotemperature field  $T, ^\circ\text{C}$  (bottom) and heat flow (top) transverse to the strike the mid-oceanic ridge (example for the southern hemisphere).



**Рис. 6.** Сопоставление значений теплового потока, осредненных вдоль пронумерованных сегментов ААРС (см. рис. 2, в), с возрастом этих сегментов. Красной линией показан примерный тренд затухания теплового потока с возрастом.

**Fig. 6.** Heat flow values averaged along the numbered AARS segments (see Fig. 2, в) and the ages of the segments. Red line – approximate trend of heat flow decrease with age.

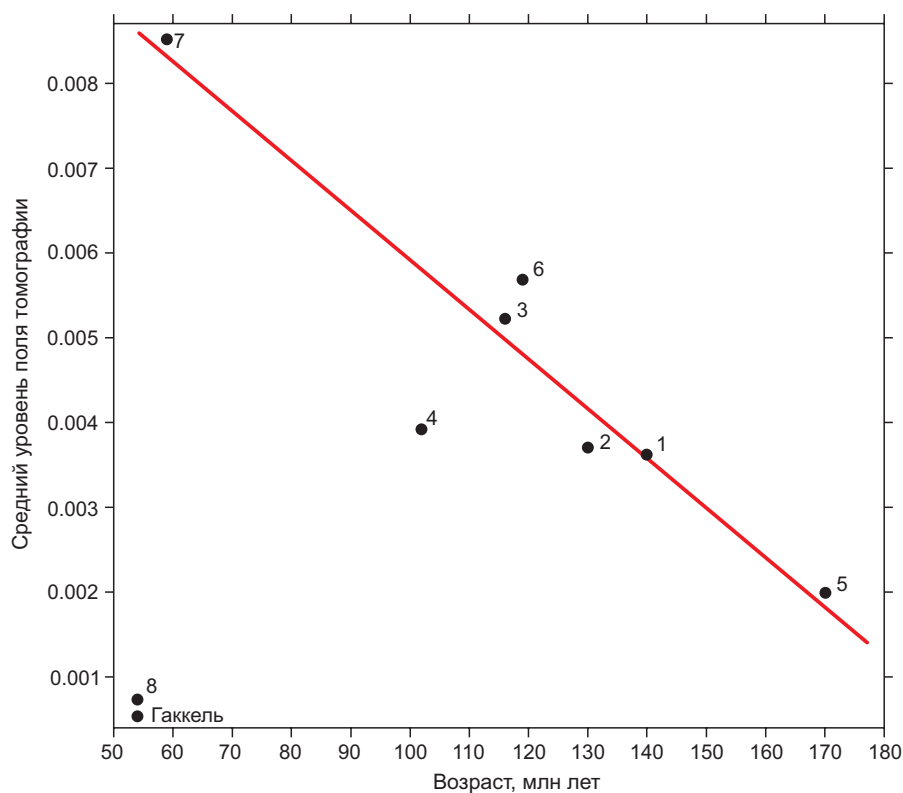
термального состояния мантии дополнительными источниками глубинного тепла, сопровождающаяся высокопродуктивным магматизмом. На рис. 2, г, показаны значения  $Na(8)$  вдоль ААРС по данным [Dmitriev et al., 2000; Michael et al., 2003]. Распределение  $Na(8)$  показывает, что минимум атрибута охватывает выход Исландского и Азорского плюмов к поверхности. Происходит маскировка значений поля скоростей и теплового потока в сегментах 5 и 6, которые на диаграмме рис. 5 имеют завышенное по сравнению с трендом значение теплового потока. Сегмент 7 (Исландский плюм), вероятно, оказался ближе к тренду из-за более молодого возраста раскрытия океана, и наложение плюма не оказало влияния на данную зависимость.

### 7. ОСРЕДНЕНИЕ ПОЛЯ ТОМОГРАФИИ ПО ВОЗРАСТНЫМ СЕГМЕНТАМ

Аналогично процедуре осреднения теплового потока по разновозрастным сегментам было проведено осреднение поля сейсмотомографии (см. рис. 2, а) по тем же сегментам. Этот подход обоснован тем, что данные сейсмической томографии имеют термальную интерпретацию и отражают соответствующее состояние недр, называемое «горячим» и «холодным» в зависимости от знака аномалий. Наложение плюмовых аномалий на ААРС привело к резкому отскоку теплового потока сегментов 5 и 6 (рис. 6) в сторону увеличения, что

дополнительно доказывает справедливость данной интерпретации томографии. Средние значения разреза рис. 2, а, в сопоставлении с возрастом показаны на рис. 7. Подобно тренду рис. 6 сопоставление осредненных значений атрибута  $\delta(Vp/Vs)$  (чем меньше значения данной вариации, тем «холоднее» или менее подвижно состояние среды) показывает остывание мантии под ААРС с возрастом после старта спрединга. Это означает, что отсутствует подпитка процессов в дивергентной зоне за счет глубинных восходящих потоков. После раскола континента происходит «вскипание» среды, затухающее с возрастом. На диаграмме рис. 7 имеется отскок сегмента 4, который, согласно разным междисциплинарным данным [Bonatti, 1996], является аномально холодным блоком верхней мантии со своей специфической тектоникой и магматизмом. Аномалия рис. 7 для данного сегмента является дополнительным подтверждением этого вывода.

Вне наблюдаемого тренда расположены осредненные значения Арктических зон – сегмента 8 (северная часть хребта Книповича и трог Лена) и хребта Гаккеля. Этому может быть два объяснения – техническое и физическое. Первое состоит в том, что в использованных для расчета атрибута  $\delta(Vp/Vs)$  покрытиях существует пониженная плотность траекторий лучей, по которым рассчитывалась модель распределения скоростей, но данный факт, по нашему мнению, не должен был



**Рис. 7.** Сопоставление значений поля томографии, осредненных вдоль пронумерованных прямоугольных сегментов ААРС (см. рис. 2, а), с возрастом этих сегментов. Красной линией показан примерный тренд затухания значений поля с возрастом.

**Fig. 7.** Tomography field values averaged along the numbered rectangular segments of the AARS (see Fig. 2, a) and the ages of the segments. Red line – approximate trend of attenuation of the field values with age.

привести к столь сильному занижению уровня поля скорости, только лишь к меньшей пространственной детальности. Второе объяснение состоит в том, что раскол континента в отсутствие плюма (амагматическая окраина) вызывает не мгновенное «вскипание» мантийной среды, а запаздывающее. Плюмовая активность в области будущей Евразийской котловины имеет юрско-мелового возраст [Karyakin, Shipilov, 2009], а раскол и образование спредингового бассейна с центром вдоль современного хребта Гаккеля, согласно текущим представлениям, произошли 54 млн лет назад. Для проверки этой гипотезы необходимо провести аналогичный анализ всех рифтовых сегментов срединно-океанических хребтов, что выходит за рамки данной работы. Попадание в тренд в сегменте 7, сходном по возрасту с хребтом Гаккеля, по-видимому, объясняется компенсацией поля суперпозицией с Исландским плюмом.

## 8. МАГМАТИЧЕСКИЕ И АМАГМАТИЧЕСКИЕ ПРОВИНЦИИ

Важной особенностью ААРС является наличие в ней участков земной коры, в разной степени насыщенных магматическими породами, что позволяет рассматривать их как магматические и амагматические провинции [Lundin et al., 2018]. Полагая разными свойства земной коры амагматических («холодных») и магматических («горячих») провинций, логично сопоставить их положение с разрезом атрибута  $\delta(V_p/V_s)$  в мантии, имеющим геодинамическую интерпретацию подвижности среды.

Поскольку магматические провинции формируются как до, так и после начала спрединга, для понимания их природы и индикаторной роли требуется некоторая систематика. Исходя из стадийности развития ААРС, которая продолжает свое активное развитие, логично выделить две принципиальные группы магматических провинций – до- и синрифтовые, которые включают все многообразие наблюдаемых образований.

**Дорифтовые магматические провинции.** В применении к ААРС термин «дорифтовые» накладывает два принципиальных ограничения: магматические провинции этой группы должны быть древнее начала спрединга и формироваться на доокеанической (континентальной) коре.

Этим требованиям соответствует Центрально-Атлантическая магматическая провинция, фрагменты которой присутствуют сегодня в Северной и Южной Америке, Европе и Африке. Дайки и силлы провинции с возрастом около 200 млн лет находятся в обрамлении самого древнего – пятого – сегмента Атлантики (см. рис. 1, 2), где спрединг начался около 170 млн лет.

Фрагменты другой дорифтовой магматической провинции с возрастом около 132 млн лет находятся в Южной Америке (Парана) и Африке (Етендека) и тяготеют к границе 2-го и 3-го сегментов ААРС с возрастом начала спрединга в интервале 120–130 млн лет (см. рис. 1, 2).

На северном фланге ААРС к дорифтовым относятся магматические провинции Северо-Атлантическая

(САМП) и Высокой Арктики (МПВА) с возрастом формирования около 60 и 125 млн лет, соответственно. Первая приурочена к седьмому сегменту ААРС, где началось спрединга (около 59 млн лет) очень близко времени формирования САМП, вторая – к хребту Гаккеля, где старт спрединга (около 54 млн лет) произошел намного позже образования МПВА.

Магматические провинции Высокой Арктики образуют три обособленных ареала проявления юрско-мелового базальтоидного магматизма: Баренцевоморский, Свердрупский и архипелага Де-Лонга, являющиеся составными частями Баренцево-Амеразийского суперплюма [Shipilov, 2004; Shipilov et al., 2009]. Зарождение последнего началось, видимо, еще в позднем триасе [Kharin, 2000]. Дальнейшее развитие в течение ранней юры привело к появлению в разрезах ЗФИ силловых тел и немногочисленных базальтовых покровов [Tarakhovskiy et al., 1982; Piskarev et al., 2009]. Связывать образование поздне триасовой вулканокластике с функционированием Сибирского плюма оснований нет, так как к этому времени он завершил свое развитие.

Массовые покровные излияния базальтов известны только на ЗФИ, единичные – на островах Земли Короля Карла. На остальной части ареала происходило внедрение базальтоидных силлов, которые прослеживаются далеко на юг вдоль Восточно-Баренцевской троговой системы. В направлении с юга на север они занимают все более высокие гипсометрические уровни в разрезе пермско-нижнемелового осадочного чехла вплоть до выхода на экзарационную поверхность дна моря на шельфе ЗФИ. Специфика и пространственно-временная позиция плюмового магматизма ЗФИ дают основание рассматривать его в качестве индикатора инициального этапа развития Арктического океана.

Внутриплитный вулканизм на границе перми и триаса (252±4 млн лет) широко проявился и в Восточной Арктике в районе Чукотского полуострова. По геохимии и изотопному составу Rb-Sr и Sm-Nd габброиды близки к контаминированным толеитовым базальтам трапповой или платформенной стадии крупной магматической провинции Сибири, но отличаются от них более высокой степенью фракционирования [Ledneva et al., 2011, 2014]. Породы, отвечающие по составу ранней и поздней стадиям становления магматической провинции Сибири, до настоящего времени на Чукотке не установлены. Имеющиеся данные недостаточны для подтверждения или отрицания возможной связи пермско-триасового – раннетриасового внутриплитного магматизма Чукотской окраины с активностью Сибирского плюма, однако они отражают колоссальный масштаб растяжения и магматической переработки континентальной коры в это время.

Приведенные данные показывают, что прямой зависимости возраста дорифтовых магматических провинций от направления проградации ААРС, равно как и связи с общей тенденцией омоложения сегментов в северном направлении, нет. Напротив, если включить в состав дорифтовых магматических провинций

сибирские траппы, обнаружится, что дорифтовые магматические провинции северного фланга ААРС имеют возраст образования, обратно пропорциональный омоложению сегментов. Формирование магматических провинций северного фланга во времени и пространстве происходило навстречу направлению развития ААРС: от пермских траппов Сибири и Чукотки через триасово-юрские траппы Высокой Арктики до современной Исландии [Shipilov et al., 2009; Ledneva et al., 2011; Gaina et al., 2013].

Встречное развитию ААРС омоложение возраста северных магматических провинций не противоречит тренду на затухание теплового потока с возрастом. Именно в этой части ААРС нижняя мантия представлена в основном «холодными» значениями атрибута  $\delta(V_p/V_s)$ , которые постепенно уменьшаются до полного исчезновения в западном направлении (см. рис. 2). Наблюдаемая в разрезе атрибута картина отражает постепенное надвигание «горячей» ветви молодого Исландского плюма, который по мере развития ААРС постепенно прогревает ранее переботанное и давно остывшее мантийное вещество.

Рассмотренные дорифтовые магматические провинции отвечают критериям определения так называемых больших магматических провинций (Large igneous provinces – LIPs) в понимании [Bryan, Ernst, 2007]. Эти авторы показали, что LIPs являются исключительно континентальными образованиями, которые в большинстве случаев существенно оторваны во времени от начала спрединга и соответственно не могут рассматриваться как его непосредственная причина.

**Синрифтовые магматические провинции.** Группа этих провинций наиболее обширна и включает в себя подводные горы, группы подводных гор, подводные хребты и аномальную кору морского дна. Общим для этих провинций является нижний предел возраста, определенный началом спрединга в ААРС (около 170 млн лет), и принадлежность океанической коре.

Некоторые синрифтовые магматические провинции могут сопровождать начальные стадии спрединга, например, в Северной Атлантике с возрастом 56–54 млн лет. Другие оказываются существенно оторванными по времени от начала спрединга. К последним относятся Тринидад – Мартин Ваз (около 85 млн лет) и Китовый хребет (около 80 млн лет) в сегментах с началом спрединга 120–130 млн лет, Азорский и Канарский архипелаги, группа подводных гор Атлантик-Метеор с миоцен-плиоценовым вулканизмом в самом древнем сегменте Атлантики и многие другие (см. рис. 1).

Как ни парадоксально, но группа синрифтовых магматических провинций оказалась наиболее сложной для точной оценки интенсивности рифтогенеза. Анализ магматических провинций в Центральной и Южной Атлантике – областях с медленным и ультрамедленным спредингом – показал, что прямого подтверждения связи интенсивности магматизма со скоростями спрединговых процессов в настоящее время нет [Lundin et al., 2018]. Связано это как со сложностью оценки

диапазона начальных скоростей спрединга по магнитным аномалиям, так и с необоснованными представлениями о синхронности старта спрединга с излияниями базальтов.

Наблюдаемые закономерности указывают на импульсный характер подъема глубинного вещества. Кроме того, ряд структур отражает динамическую подвижность ветвей плюма. Например, в экваториальном секторе Атлантики парная система возвышенностей Сьерра-Леоне и Сеара образует симметричный рисунок минимумов аномального магнитного поля (АМП) типа «бычьих глаз» (bulls eyes). Такая конфигурация могла образоваться при кратковременном пересечении ветви плюма с осью САХ при непродолжительном импульсе поступления расплава по данному ответвлению с последующим затуханием магматической активности. Если при продолжении активности плюма ось ААРС смещается в сторону, возникают конфигурации вида Риу-Гранди – Китовый хребет. Активные в настоящее время плюмы около оси ААРС могут иметь в верхней мантии несколько каналов выхода к поверхности и формировать в обрамлении цепочки подводных гор. Анализ характера АМП между разломами Атлантик и Вима, находящимися соответственно в Северной и Южной (экваториальной) Атлантике, позволил выявить шесть парных относительно САХ зон [Sokolov, 2018].

Таким образом, синрифтовые магматические провинции обнаруживают принципиальные отличия от дорифтовых. Большинство из синрифтовых магматических образований можно связать с действием долгоживущих аномалий в мантии, имеющих меньшие скорости магмогенерации, чем при формировании LIP [Bryan, Ernst, 2007].

## 9. СИНТЕЗ

**Сегментация ААРС.** Сегментация ААРС (см. рис. 1), перенесенная на разрез (см. рис. 2) вместе со временем начала спрединговых процессов, показывает следующее. Сегмент 5 с возрастом ~170 млн лет – наиболее древний сегмент ААРС – имеет максимально «холодное» пространство от поверхности до границы ядро – мантия. Аналогичное проявление холодного состояния имеет мантия под северо-западным сегментом Тихого океана, где возраст фундамента по магнитным аномалиям оценивается в 150–180 млн лет. Следующими по возрасту являются сегменты 1 и 2 (см. рис. 2, а), в которых проявление «холодного» состояния достаточно велико, но меньше, чем в сегменте 5. Вполне возможно, что во многих сегментах наложение ветвей плюма образует маскировку более «холодного» состояния, например в сегменте 6. Это затрудняет установление связи между возрастом и термальным состоянием. Сегмент 3 имеет достаточно большое «холодное» пространство в мантии. Сегмент 4 насыщен несколькими «холодными» линзами над границей 670 км, и его глубокая часть испытывает суперпозицию с ответвлением плюма, подводящим прогретое вещество к магматическим системам островов Зеленого Мыса и Канарских. Наиболее

молодой частью ААРС являются сегменты 7 и 8, а также хребет Гаккеля, как головная часть ААРС. Разделение состояния мантии на компоненты плюмовые и неплюмовые не представляется осуществимым в настоящее время. Уверенно говорить о зависимости термального состояния мантии от возраста старта спрединговых процессов можно уже на качественном уровне: чем древнее начало спрединга в сегменте, тем более «холодные» средние характеристики должна иметь мантия в отображении атрибута  $\delta(Vp/Vs)$ .

В разрезе  $\delta(Vp/Vs)$  основные демаркационные разломы и «холодные» аномалии верхней мантии расположены в местах максимального субширотного смещения ААРС, имеющего левосдвиговую морфологию. Наиболее ярким примером такого смещения является группа разломов экваториального сегмента, сдвоенная разломная система Чарли Гиббс и смещение ААРС по хребту Книповича и трогу Лена к переходу в хребет Гаккеля. Смещение над «холодной» мантией может быть выражено обычными трансформными смещениями, но чаще оно распадается на сдвоенные и полиразломные системы.

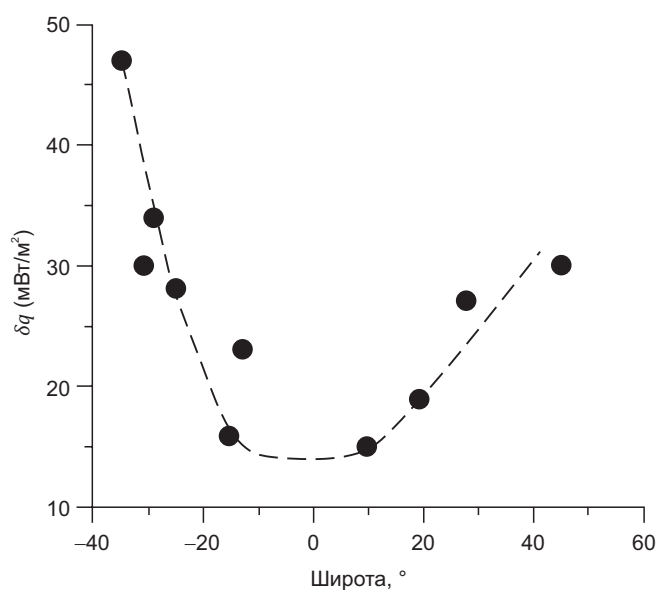
**Сейсмичность.** Распределение суммарного момента (см. рис. 2, б) было построено для трех глубинных интервалов. Интервал >35 км содержит мало событий, и делать какие-либо заключения по его расхождению с менее глубоководными событиями нецелесообразно. В интервалах 0–13 и 13–35 км наблюдается практически синхронное распределение момента, но есть ряд расхождений. Экстремумы плюмовых ветвей Тристан-да-Кунья, Азорских островов, Исландии и средней части хребта Гаккеля в поверхностном слое больше, чем в среднем. Это указывает на преимущественно коровое положение очагов, связанное с высокопродуктивным магматизмом. Исключение составляет район Исландии, где в среднем интервале наблюдается отдельный пик момента, смещенный на север к 67° с.ш., что указывает на сложную глубинную конфигурацию прогретого вещества плюма. Отметим, что главные демаркационные зоны – экваториальная и переход от Северной Атлантики к Арктике – отличаются максимальным энерговыделением с событиями сдвигового механизма [Boldyrev, 1998]. При этом арктический переход имеет экстремумы на всех интервалах, что указывает на глубинное заложение дизъюнктивных нарушений. Экваториальный переход не отмечен событиями глубже 35 км, но значения момента на двух верхних интервалах синхронизированы. Тем не менее северная часть этого перехода около разломов Сьерра-Леоне и Вима имеет экстремумы только в коровом интервале, что выглядит необычно при сравнении с южным обрамлением экваториального перехода. Возможно, это связано с тем, что данный сегмент имеет необычную конфигурацию горизонтального движения из-за бокового воздействия на него Антильской дуги [Sokolov, 2018].

**Тепловой поток.** Объяснение феномена геотермической асимметрии флангов ААРС требует не только

корректировки основных положений парадигмы спрединга океанского дна, но и более глобальных, планетарных причин проявления асимметрии в быстро- и медленно-спрединговых хребтах. Возможны как минимум две причины, осложняющие симметричный дивергентный механизм. Это различающийся возраст блоков тектонических плит по разные стороны от оси хребта и/или наложение вторичных процессов на первичный спрединг, которые идут с выделением или поглощением энергии. Среди таких процессов можно указать на растяжение коры в аккреционной зоне и в смежных абиссальных котловинах, которое сопровождается образованием листрических сбросов, а также образование шарьированных блоков, экранирующих глубинный тепловой поток. С этими тектоническими процессами неразрывно связано сложное перераспределение конвективных потоков в верхней части океанской литосферы, которое фиксируется в геотермическом поле наличием аномально высоких и аномально низких (и даже нулевых) значений теплового потока. Перечисленные факторы, несомненно, требуется учитывать при анализе геотермического поля океанской коры, но они не объясняют разное «направление асимметрии» в Северном и Южном полушариях.

На любую материальную точку Земли ( $m$ ) из-за ее вращения против часовой стрелки относительно Северного полюса с угловой скоростью ( $\omega$ ) будет действовать сила Кориолиса  $F_k = 2m \cdot v \cdot \omega \cdot \sin \varphi$ , которая в Южном полушарии будет смещать массу влево относительно радиуса, а в Северном, соответственно, вправо. В дивергентных зонах такой массой является магма, скопившаяся в астеносферном мантийном резервуаре и перемещающаяся внутри него под действием силы Кориолиса. Избыточная энтальпия этой массы обуславливает то специфическое распределение конвективного и кондуктивного теплового потока, которое мы наблюдаем в дивергентных зонах. Конвективная разгрузка глубинного тепломассопотока направлена строго вдоль разломной рифтовой зоны и выражается, в конечном итоге, в виде вулканических проявлений на морском дне. В то же время главным источником кондуктивного теплового потока на флангах ААРС и в смежных абиссальных котловинах является присутствие фракционно-расплавленного мантийного материала в астеносферном резервуаре. Концентрация магмы в этом резервуаре асимметрична, что обуславливается влиянием силы Кориолиса (рис. 8). Появление большего количества высокоэнтальпийной массы на одном из флангов объясняет наблюдаемую асимметрию кондуктивного теплового потока.

Мы предлагаем ввести «количественный показатель геотермической асимметрии», который характеризуется абсолютной величиной разницы средних значений теплового потока на разных флангах ААРС:  $\delta q = |q_1 - q_2|$ . Из-за увеличения силы Кориолиса по направлениям к полюсам Земли этот показатель должен быть больше для геотраверсов в высоких широтах, чем в приэкваториальных. На рис. 8 по оси ординат отложена



**Рис. 8.** Зависимость показателя геотермической асимметрии  $\delta q$  от географической широты.

**Fig. 8.** Index of geothermal asymmetry  $\delta q$  vs geographical latitude.

величина  $\delta q$  для всех изученных пересечений ААРС как функция широты его расположения. Фиттинговая аппроксимация (пунктирная кривая) имеет форму параболы с минимумом на широте экватора.

**Магматические провинции.** Дорифтовые магматические провинции (собственно LIPs) образованы процессами, происходившими исключительно в континентальной земной коре. Поскольку для формирования LIPs требуется растяжение континентальной коры, они, очевидно, способствовали ее переработке, но не являлись причиной спрединга. Дорифтовые магматические провинции отражают ранние этапы расширения Земли, когда сил на крупномасштабный разрыв коры было еще недостаточно. Когда же условия для крупномасштабного спрединга с образованием океанической коры были реализованы, процесс следовал принципу минимизации энергетических затрат и дорифтовые магматические провинции с предварительно переработанной корой могли способствовать выбору и оформлению траектории ААРС.

Синрифтовые магматические провинции имеют нижний предел возраста, определяемый временем старта спрединга, и зависят от импульсного поступления вещества из долгоживущих плюмов. Это пассивные образования, которые сопровождают, но не инициируют спрединговые процессы в океанической коре. Основу тектогенеза составляют сдвиговые процессы, прежде всего трансферные смещения в форме левых сдвигов по границам сегментов. Они контролируются закономерностями существования вращающегося планетарного тела и не только не зависят от существования плюмов, но, напротив, определяют положение ослабленных зон для проникновения ветвей последних в верхние горизонты океанической коры.

Прямой зависимости возраста магматических провинций от направления проградации ААРС, равно как и связи с общей тенденцией омоложения сегментов в северном направлении, не установлено. Развитие дорифтовых магматических провинций определялось региональными процессами растяжения континентальной коры, формирование синрифтовых – контролировалось импульсами проникновения ветвей плюмов в океаническую кору. В то же время на всех этапах развития ААРС имело место наложение молодой магматической активности на более древние образования. Это явление наглядно выражено в надвигании «горячей» ветви молодого Исландского плюма на ранее переработанное и давно остывшее нижнемантийное вещество в регионе Высокой Арктики.

Наложение ветвей плюма затрудняет установление связи между возрастом и термальным состоянием, однако не отменяет тенденции к остыванию мантии под ААРС пропорционально времени с начала спрединга. Это важнейшее наблюдение свидетельствует об отсутствии закономерной (конвейерной) подпитки дивергентных зон за счет глубинных восходящих потоков.

## 10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегментация ААРС по возрасту раскола континентальных плит показывает, что существует зависимость термального состояния мантии от возраста старта спрединговых процессов: чем древнее начало спрединга в сегменте, тем более «холодные» средние характеристики имеет мантия в сегменте в отображении атрибута  $\delta(V_p/V_s)$ . В разрезе  $\delta(V_p/V_s)$  основные демаркационные разломы и «холодные» аномалии верхней мантии расположены в местах максимального субширотного левосдвигового смещения ААРС. Наибольшими подобными смещениями являются: группа разломов экваториального сегмента, сдвоенная разломная система Чарли Гиббс и смещение ААРС по хребту Книповича и трогу Лена к переходу в хребет Гаккеля. Смещение над «холодной» мантией может быть выражено обычными трансформными смещениями, но чаще оно распадается на сдвоенные и полиразломные системы.

Распределение суммарного момента в интервалах глубин 0–13 и 13–35 км практически синхронное. Экстремумы плюмовых ветвей Тристан-да-Кунья, Азорских островов, Исландии и средней части хребта Гаккеля представлены бóльшим моментом в поверхностном слое, что указывает на преимущественно коровое положение очагов, связанное с высокопродуктивным магматизмом. Главные демаркационные зоны – экваториальная и переход от Северной Атлантики к Арктике – отличаются максимальным энерговыделением с событиями сдвигового механизма, причем арктический переход имеет экстремумы на всех интервалах, что указывает на глубинное заложение дизъюнктивных нарушений. Экваториальный переход не отмечен событиями глубже 35 км, но значения момента на двух верхних интервалах синхронизированы.

Вблизи третьего по величине широтного смещения ААРС вдоль трансформного разлома Чарли Гиббс, обладающего одним из максимумов суммарного сейсмического момента, наблюдается инверсия полускоростей к югу от разлома с западного преобладания на восточное. Такое кинематическое соотношение полускоростей, полученных по магнитным данным, должно усиливать латеральное смещение оси ААРС и инициировать повышенный сейсмический фон.

Установлено, что минимальные значения атрибута Na(8) соответствуют районам осевой зоны ААРС, в которых геофизическими методами установлены четкие признаки активных мантийных плюмовых струй.

Полученные путем сопоставления с возрастом старта спрединговых процессов сходные тренды теплового потока и среднего уровня поля томографии по сегментам ААРС подтверждают правильность термальной интерпретации данных сейстотомографии. Кроме того, полученная тенденция к остыванию среднего показателя температуры мантии по обоим параметрам при осреднении на всем пространстве от литосферы до границы с ядром указывает на отсутствие регулярной энергетической «подпитки» в процессе океанообразования с момента его старта. С помощью статистического анализа показано, что главным фактором, обуславливающим асимметрию теплового потока в дивергентных зонах Мирового океана, является действие силы Кориолиса на высокоэнтальпийные магматические массы в астеносферном очаге.

Синрифтовые магматические провинции обнаруживают принципиальные отличия от дорифтовых. Большинство синрифтовых магматических образований можно связать с действием долгоживущих аномалий в мантии, имеющих меньшие скорости магмогенерации, чем при формировании LIP. При реализации условий для крупномасштабного спрединга с образованием океанической коры процесс следует принципу минимизации энергетических затрат и дорифтовые магматические провинции с предварительно переработанной корой способствуют выбору и оформлению траектории ААРС. Наложение ветвей плюма маскирует связь между возрастом и термальным состоянием, однако не отменяет тенденции к остыванию мантии под ААРС пропорционально времени с начала спрединга.

## 11. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- ANSS Earthquake Composite Catalog, 2014. Available from: <http://quake.geo.berkeley.edu/anss/> (Last Accessed 11.02.2014).
- Aplonov S.V., Trunin A.A., 1995. Migration of Local Spreading Instability along the Divergent Boundary Axis: Mid-Atlantic Ridge Between Marathon and Kane Transform Faults. *Physics of the Earth* 9, 24–34 (in Russian) [Аплов С.В., Трунин А.А. Миграция локальной неустойчивости спрединга вдоль оси дивергентной границы: Срединно-Атлантический хребет между трансформными разломами Марафон и Кейн // *Физика Земли*. 1995. № 9. С. 24–34].
- Becker T.W., Boschi L., 2002. A Comparison of Tomographic and Geodynamic Mantle Models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 3 (1), 2001GC000168. <https://doi.org/10.1029/2001GC000168>.
- Boldyrev S.A., 1998. Seismogeodynamics of the Mid-Atlantic Range. MGC, Moscow, 124 p. (in Russian) [Болдырев С.А. Сейсмогеодинамика Срединно-Атлантического хребта. М.: МГК, 1998. 124 с.].
- Bonatti E., 1996. Origin of the Large Fracture Zones Offsetting the Mid-Atlantic Ridge. *Geotectonics* 30 (6), 430–440.
- Bryan S., Ernst R., 2007. Revised Definition of Large Igneous Province (LIPs). *Earth Science Reviews* 86 (1–4), 175–202. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.08.008>.
- Dmitriev L.V., Silantiev S.A., Sokolov S.Yu., Plechov A.A., 2000. The Comparison of Basalt Magmatism in the Conditions of Different Velocity of Spreading by the Example of the Mid-Atlantic Ridge and the East Pacific Rise. *Russian Journal of Earth Sciences* 2 (3), 207–226 (in Russian) [Дмитриев Л.В., Силантьев С.А., Плечова А.А., Соколов С.Ю. Сравнение базальтового магматизма в условиях разной скорости спрединга на примере Срединно-Атлантического хребта (САХ) и Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП) // *Российский журнал наук о Земле*. 2000. Т. 2. № 3. С. 207–226]. <https://doi.org/10.2205/2000ES000041>.
- Dmitriev L.V., Sokolov S.Y., 2003. Geodynamics of Three Contrasting Types of Oceanic Magmatism and Their Reflection in the Data of Seismic Tomography. *Petrology* 11 (6), 597–613.
- Eldholm O., Coffin M.F., 2000. Large Igneous Provinces and Plate Tectonics. In: M.A. Richards, R.G. Gordon, R.D. Van der Hilst (Eds), *The History and Dynamics of Global Plate Motions*. AGU Geophysical Monograph Series, Vol. 121, p. 309–326. <https://doi.org/10.1029/GM121p0309>.
- Foster S.E., Simmons G., Lamb W., 1974. Heat Flow near a North Atlantic Fracture Zone. *Geothermics* 3 (1), 3–16. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(74\)90030-3](https://doi.org/10.1016/0375-6505(74)90030-3).
- Gaina C., Medvedev S., Torsvik T.H., Koulakov I., Werner S.C., 2013. 4D Arctic: A Glimpse into the Structure and Evolution of the Arctic in the Light of New Geophysical Maps, Plate Tectonics and Tomographic Models. *Surveys in Geophysics* 35 (5), 1095–1122. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9254-y>.
- Global Heat Flow Database, 2018. University of North Dakota. Available from: <https://engineering.und.edu/research/global-heat-flow-database/data.html>.
- Grand S.P., van der Hilst R.D., Widiantoro S., 1997. Global Seismic Tomography: A Snapshot of Convection in the Earth. *GSA Today* 7 (4), 1–7.
- Karyakin Y.V., Shipilov E.V., 2009. Geochemical Specifics and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Age of the Basaltoid Magmatism of the Alexander Land, Northbrook, Hooker, and Hayes Islands (Franz Josef Land Archipelago). *Doklady Earth Sciences* 425 (1), 260–263. <https://doi.org/10.1134/s1028334x09020196>.
- Kharin G.S., 2000. Impulses of magmatism of the Icelandic plume. *Petrology* 8 (2), 115–130 (in Russian) Харин Г.С. Импульсы магматизма Исландского плюма // *Петрология*. 2000. Т. 8. № 2. С. 115–130.



- Khutorskoi M.D., Polyak B.G., 2017. Special Features of Heat Flow in Transform Faults of the North Atlantic and Southeast Pacific. *Geotectonics* 51 (2), 152–162. <https://doi.org/10.1134/s0016852117010022>.
- Khutorskoy M.D., Teveleva E.A., 2018. Asymmetry of the Heat Flow at the Mid-Oceanic Ridges in the Northern and Southern Hemispheres. *Georesources* 20 (2), 122–132 (in Russian) [Хуторской М.Д., Тевелева Е.А. Асимметрия теплового потока на срединно-океанических хребтах в Северном и Южном полушариях Земли // Георесурсы. 2018. Т. 20. № 2. С. 122–132]. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.2.122-132>.
- Klein E.M., Langmuir C.H., 1987. Global Correlation of Ocean Ridge Basalt Chemistry with Axial Depth and Crustal Thickness. *Journal of Geophysical Research* 92 (B8), 8089–8115. <https://doi.org/10.1029/JB092iB08p08089>.
- Lebedev S., van der Hilst R.D., 2008. Global Upper-Mantle Tomography with the Automated Multimode Inversion of Surface and S-Wave Forms. *Geophysical Journal International* 173 (2), 505–518. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03721.x>.
- Ledneva G.V., Bazylev B.A., Layer P.W., Ishiwatari A., Sokolov S.D., Kononkova N.N., Tikhomirov P.L., Novikova M.S., 2014. Intra-Plate Gabbroic Rocks of Permo-Triassic to Early-Middle Triassic Dike-and-Sill Province of Chukotka (Russia). In: D.B. Stone, G.E. Grikurov (Eds), *ICAM VI: Proceedings of the International Conference on Arctic Margins VI* (Fairbanks, Alaska, May 2011). VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, p. 115–156.
- Ledneva G.V., Pease V.L., Sokolov S.D., 2011. Permo-Triassic Hypabyssal Mafic Intrusions and Associated Tholeiitic Basalts of the Kolyuchinskaya Bay, Chukotka (NE Russia): Links to the Siberian LIP. *Journal of Asian Earth Science* 40 (3), 737–745. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.11.007>.
- Lukina N.V., Patyk-Kara N.G., Sokolov S.Yu., 2004. Neotectonic Structures and Active Faults of the Arctic Shelf of Russia. In: M.N. Alekseeva (Ed.), *Geology and Mineral Resources of the Russian Shelf Areas. Atlas*. Nauchny Mir, Moscow, p. 3 (in Russian) [Лукина Н.В., Патык-Кара Н.Г., Соколов С.Ю. Неотектонические структуры и активные разломы Арктического шельфа России // Геология и минеральные ресурсы шельфов России. Атлас / Ред. М.Н. Алексева. М.: Научный мир, 2004. С. 3].
- Lundin E.R., Doré A.G., Redfield T.F., 2018. Magmatism and Extension Rates at Rifted Margins. *Petroleum Geoscience* 24 (4), 379–392. <https://doi.org/10.1144/petgeo2016-158>.
- Michael P.J., Langmuir C.H., B. Dick H.J., Snow J.E., Goldstein S.L., Graham D.W., Lehnert K., Kurras G., Jokat W., Muhe R., Edmonds H.N., 2003. Magmatic and Amagmatic Seafloor Generation at the Ultraslow-Spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean. *Nature* 423 (6943), 956–961. <https://doi.org/10.1038/nature01704>.
- Müller R.D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W.R., 2008. Age, Spreading Rates, and Spreading Asymmetry of the World's Ocean Crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9 (4), Q04006. <https://doi.org/10.1029/2007GC001743>.
- Piskarev A.L., Heunemann C., Makar'ev A.A., Makar'eva A.M., Bachtadse V., Aleksyutin M., 2009. Magnetic Parameters and Variations in the Composition of Igneous Rocks of the Franz Josef Land Archipelago. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 45 (2), 150–166. <https://doi.org/10.1134/s1069351309020050>.
- Piskarev A.L., Poselov V.A., Avetisov G.P., Butsenko V.V., Glebovsky V.Yu., Gusev E.A., Zholondz S.M., Kaminsky V.D., Kireev A.A., Smirnov O.E., Firsov Yu.G., Zinchenko A.G., Pavlenkin A.D., Poselova L.G., Savin V.A., Chernykh A.A., Elkina D.V., 2016. Arctic Basin (Geology and Morphology). *VNIIOkeangeologia, Saint Petersburg*, 291 p. (in Russian) [Пискарев А.Л., Поселов В.А., Аветисов Г.П., Буценко В.В., Глебовский В.Ю., Гусев Е.А., Жолондз С.М., Каминский В.Д., Киреев А.А., Смирнов О.Е., Фирсов Ю.Г., Зинченко А.Г., Павленкин А.Д., Поселова Л.Г., Савин В.А., Черных А.А., Элькина Д.В. Арктический бассейн (геология и морфология). СПб.: ВНИИОкеангеология, 2016. 291 с.].
- Podgornykh L.V., Khutorskoy M.D., 1997. Planetary Heat Flow Map. Scale 1:30000000. Explanatory Note. Publishing House of Oceanology Institute, Moscow, Saint Petersburg, 33 p. (in Russian) [Подгорных Л.В., Хуторской М.Д. Карта планетарного теплового потока. Масштаб 1:30000000. Объяснительная записка. М.–СПб.: Изд-во ВНИИОкеангеология, 1997. 33 с.].
- Polyak B.G., Kononov V.I., Khutorskoy M.D., 1984. Heat Flow and the Lithosphere Structure of Iceland in the Light of New Data. *Geotectonics* 1, 111–119 (in Russian) [Поляк Б.Г., Кононов В.И., Хуторской М.Д. Тепловой поток и строение литосферы Исландии в свете новых данных // Геотектоника. 1984. № 1. С. 111–119].
- Popova A.K., Smirnov Ya.B., Khutorskoy M.D., 1984. Geothermal Field of Transform Faults. In: Yu.P. Neprochnov (Ed.), *Deep Faults of the Oceanic Floor*. Nauka, Moscow, p. 78–87 (in Russian) [Попова А.К., Смирнов Я.Б., Хуторской М.Д. Геотермическое поле трансформных разломов // Глубинные разломы океанского дна / Ред. Ю.П. Непрочнонов. М.: Наука, 1984. С. 78–87].
- Shipilov E.V., 2004. Tectono-Geodynamic Evolution of Arctic Continental Margins during Epochs of Young Ocean Formation. *Geotectonics* 38 (5), 343–365.
- Shipilov E.V., Karyakin Y.V., Matishov G.G., 2009. Jurassic-Cretaceous Barents-Amerasian Superplume and Initial Stage of Geodynamic Evolution of the Arctic Ocean. *Doklady Earth Sciences* 426 (1), 564–566. <https://doi.org/10.1134/s1028334x09040126>.
- Sokolov S.Yu., 2014. The State of Geodynamic Mobility in the Mantle According to Seismic Tomography and the Ratio of P- and S-Wave Velocities. *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center"*. *Earth Sciences* (2), 55–67 (in Russian) [Соколов С.Ю. Состояние геодинамической подвижности в мантии по данным сейсмографии и отношению скоростей Р и S волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 2. С. 55–67.].
- Sokolov S.Yu., 2016. Features of Tectonics of the Mid-Atlantic Ridge According to the Correlation of Surface Parameters with the Geodynamic State of the Upper Mantle. *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center"*. *Earth Sciences* (4), 88–105 (in Russian) [Соколов С.Ю. Особенности тектоники Срединно-

Атлантического хребта по данным корреляции поверхностных параметров с геодинамическим состоянием верхней мантии // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 4. С. 88–105].

Sokolov S.Yu., 2017. Atlantic-Arctic Rift System: an Approach to the Geodynamic Description According to Seismic Tomography and Seismicity. Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences (4), 79–88 (in Russian) [Соколов С.Ю. Атлантико-Арктическая рифтовая система: подход к геодинамическому описанию по данным сейсмической томографии и сейсмичности // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 4. С. 79–88].

Sokolov S.Yu., 2018. Tectonics and Geodynamics of the Equatorial Segment of the Atlantic. Proceedings of GIN RAS. Issue 618. Nauchny Mir, Moscow, 269 p. (in Russian) [Соколов С.Ю. Тектоника и геодинамика экваториального сегмента Атлантики. Труды ГИН РАН. Вып. 618. М.: Научный мир, 2018. 269 с.].

Sorokhtin O.G., 1974. Global Evolution of the Earth. Nauka, Moscow, 184 p. (in Russian) [Сорохтин О.Г. Глобальная эволюция Земли. М.: Наука, 1974. 184 с.].

Tarakhovsky A.N., Fishman M.V., Shkola I.V., Andreichev V.L., 1982. The Age of Franz Joseph Land Trappes. Reports of the USSR Academy of Sciences 266 (4), 965–969 (in Russian) [Тараховский А.Н., Фишман М.В., Школа И.В., Андреичев В.Л. Возраст траппов Земли Франца-Иосифа // Доклады АН СССР. 1982. Т. 266. № 4. С. 965–969].

Van der Hilst R.D., Widiyantoro S., Engdahl E.R., 1997. Evidence for Deep Mantle Circulation from Global Tomography. Nature 386 (6625), 578–584. <https://doi.org/10.1038/386578a0>.

Zarayskaya Yu.A., 2013. Seismic Activity of Strong Volcanic Eruptions of Ultra-Slow Spreading Ridges of Gakkel, Southwest Indian and Reykjanes. In: Geology of Seas and Oceans. Materials of the XX International Scientific Conference (School) on Marine Geology. Vol. V. GEOS, Moscow, p. 111–115 (in Russian) [Зарайская Ю.А. Сейсмическая активность сильных вулканических извержений ультра-медленных спрединговых хребтов Гаккеля, Юго-Западного Индийского и Рейкьянес // Геология морей и океанов: Материалы XX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М.: GEOS, 2013. Т. V. С. 111–115].

#### **SERGEY YU. SOKOLOV**

Candidate of Physics and Mathematics, Head of laboratory Geological Institute of RAS  
7 Pyzhevsky Ln, Moscow 119017, Russia  
e-mail: [sysokolov@yandex.ru](mailto:sysokolov@yandex.ru)  
ORCID: [0000-0002-7197-852X](https://orcid.org/0000-0002-7197-852X)

#### **СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ СОКОЛОВ**

канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией  
Геологический институт РАН  
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия

#### **NIKOLAY P. CHAMOV**

Doctor of Geology and Mineralogy, Head of laboratory Geological Institute of RAS  
7 Pyzhevsky Ln, Moscow 119017, Russia  
e-mail: [nchamov@yandex.ru](mailto:nchamov@yandex.ru)

#### **НИКОЛАЙ ПЕТРОВИЧ ЧАМОВ**

докт. геол.-мин. наук, зав. лабораторией  
Геологический институт РАН  
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия

#### **MIKHAIL D. KHUTORSKOY**

Doctor of Geology and Mineralogy, Head of laboratory Geological Institute of RAS  
7 Pyzhevsky Ln, Moscow 119017, Russia  
e-mail: [mdkh1@yandex.ru](mailto:mdkh1@yandex.ru)

#### **МИХАИЛ ДАВЫДОВИЧ ХУТОРСКОЙ**

докт. геол.-мин. наук, зав. лабораторией  
Геологический институт РАН  
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия

#### **SERGEY A. SILANTIEV**

Doctor of Geology and Mineralogy, Head of laboratory V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS  
19 Kosygin St, Moscow 119991, Russia  
e-mail: [silantyevev@geokhi.ru](mailto:silantyevev@geokhi.ru)

#### **СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ СИЛАНТЬЕВ**

докт. геол.-мин. наук, зав. лабораторией  
Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН  
119991, Москва, ул. Косыгина, 19, Россия