



THE DEPTH GEODYNAMIC STATE AND ITS CORRELATION WITH THE SURFACE GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL PARAMETERS ALONG THE SUBLATITUDINAL PROFILE OF EURASIA

S. Yu. Sokolov

Geological Institute of RAS, Moscow, Russia

Abstract: A cross-sections of longitudinal (P) and transverse (S) wave anomalies (attribute $\delta(V_P/V_S)$) is constructed along the sublatitudinal profile from the Atlantic Ocean to the Pacific Ocean across the regions of the latest Eurasian volcanism. It is correlated with surface geophysical parameters interpretable in terms of geodynamics: heat flow, seismicity and integrated conductivity of the lithosphere. All the volcanic groups are related to the negative anomalies of S- and P-wave velocity variations at depths, which are observed in the eastern part of the profile from Central Asia to the Pacific Ocean to depths of 1000 km. Such anomalies correlate with the heat flow anomalies and are thus indicative of a deep source. The absence of deep roots in the western part of the profile from the Caspian to the Western Mediterranean suggests lateral extension of the anomalously 'hot' mantle from the Afar branch of the African superplume. The groups of volcanic formations in the Baikal region and the Far East are spatially associated with heat flow anomalies that are three times higher than the background values. A correlation between intraplate volcanism and the lithosphere conductivity suggests the presence of positive anomalies in all volcanic clusters, despite the fact that their background values are considerably different. In the continental part, velocity anomalies are typical of all volcanic groups with positive conductivity anomalies. It is evidenced by seismic tomography that all the volcanic groups (except the Alpine-Caucasian) have 'hot' roots in the upper mantle to depths of 1200 km. The highest maximum conductivity values are typical of the zones wherein high intraplate seismicity is absent. Along the profile, there are several zones of high intraplate seismicity, which are separated by aseismic zones or plate boundaries. This suggest the influence of the heated state of the mantle and the occurrence of zones of increased conductivity in the lithosphere.

Key words: geodynamics; heat flow; seismic tomography; V_P/V_S ratio; seismicity; conductivity; volcanogenic area

RESEARCH ARTICLE

Received: December 7, 2018

Revised: March 29, 2019

Accepted: May 23, 2019

For citation: Sokolov S.Yu., 2019. The depth geodynamic state and its correlation with the surface geological and geophysical parameters along the sublatitudinal profile of Eurasia. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (4), 945–957. doi:10.5800/GT-2019-10-4-0451.

Funding: This study was supported by the Presidium of the Russian Academy of Sciences (Program No. 15 – Natural Disasters and Adaptation Processes in the Context of a Changing Climate and the Development of Nuclear Energy). Data analysis of hazardous geological phenomena was partially under State Contract No. 0135-2016-0013 of the Geological Institute RAS (Hazardous Geological Processes in the World Oceans: Relation to the Geodynamic State of the Crust and Upper Mantle and Modern Movements in the Ocean).

ГЛУБИННОЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И ЕГО СОПОСТАВЛЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТНЫМИ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ВДОЛЬ СУБШИРОТНОГО РАЗРЕЗА ЕВРАЗИИ

С. Ю. Соколов

Геологический институт РАН, Москва, Россия

Аннотация: Проведено сопоставление разреза аномалий продольных (P) и поперечных (S) волн, атрибута $\delta(V_P/V_S)$ вдоль субширотного профиля от Атлантического океана до Тихого по районам новейшего вулканизма Евразии с поверхностными геофизическими параметрами, имеющими геодинамическую интерпретацию: тепловым потоком, сейсмичностью и интегральной проводимостью литосферы. Все вулканические группы связаны с глубинными отрицательными аномалиями вариаций скоростей S-волн или P-волн, которые в восточной части профиля от Средней Азии до Тихого океана отмечаются до глубин 1000 км и коррелируют с аномалиями теплового потока, указывая на глубинный тип источника. Отсутствие глубинных корней в западной части профиля от Каспия до Западного Средиземноморья свидетельствует о боковом продолжении аномальной «горячей» мантии от Афарской ветви Африканского суперплюма. Группы вулканических образований Байкальского региона и Дальнего Востока ассоциированы в пространстве с аномалиями теплового потока в три раза выше фоновых значений. Сопоставление внутриплитного вулканизма с проводимостью литосферы дает основание предполагать наличие положительных аномалий во всех вулканических кластерах, несмотря на сильно отличающиеся по уровню фоновые значения. В континентальной части разреза все вулканические группы с положительными аномалиями проводимости сопровождаются аномалиями скоростей. Все они, кроме Альпийско-Кавказской, имеют в сейсмоотомографическом отображении «горячие» корни в верхней мантии до глубин 1200 км. Наибольшие максимумы проводимости наблюдаются в зонах отсутствия сильной внутриплитной сейсмичности, которая вдоль профиля группируется в несколько зон, разделенных асейсмичными интервалами или границами плит. Это говорит о влиянии прогретого состояния мантии с формированием зон повышенной проводимости в литосфере.

Ключевые слова: геодинамика; тепловой поток; сейсмическая томография; отношение V_P/V_S ; сейсмичность; проводимость; вулканогенная область

1. ВВЕДЕНИЕ

Поверхностные геолого-геофизические характеристики, отражающие геодинамическую активность среды, очевидно, связаны с глубинным геодинамическим состоянием. Определение этого понятия связано с реологией среды – с ее способностью течь, а также вариацией этого состояния в пространстве. Индикатором глубинного состояния среды являются вариации скоростей распространения сейсмических волн, выраженные в сейсмоотомографических моделях мантии процентами отклонения от референтной радиально-симметричной модели скоростей. Основным отражением этих вариаций является термальное состояние мантии, рассматриваемое для моделей как продольных (P), так и поперечных (S) волн. В рамках этой интерпретации существует возможность формирования представления о глубинной геодинамике, но параметром, в большей степени отражающим способность среды к перемещению, является отношение скоростей V_P/V_S , зависящее от коэффициента Пуас-

сона. Последний отражает степень сходства среды с жидкостью и является интегральным параметром, зависящим от влияния температуры, вещественного состава, степени частичного плавления, вязкости и т.д. В прикладной сейсморазведке активно используются построенные на основе V_P/V_S атрибуты для поиска флюидонасыщенных зон. Для исходных моделей P- и S-скоростей разрез мантии (V_P/V_S) по субширотному профилю через Евразию, анализируемому в настоящей работе, имеет конфигурацию, заметно отличающуюся от исходных моделей [Sokolov, 2014], и отражает глубинное геодинамическое состояние, которое в работе сопоставлено с поверхностными характеристиками.

В качестве основных поверхностных геодинамических параметров исследуется сейсмичность, тепловой поток, скопления новейших вулканических построек. Поскольку частично расплавленное состояние мантии и тепловой поток, возможно обусловленный флюидным фактором, влияют на глубинную электропроводность [Zhdanov et al., 1988], предпринята попытка дополнения набора поверх-

ностных параметров глобальной моделью электропроводности литосферы [Alekseev et al., 2015].

Активные в настоящее время вулканогенные области, питаемые глубинными мантийными источниками, расположены над зонами с подвижным геодинамическим и частично расплавленным состоянием мантии, определяемым по отношению V_P/V_S . В литературе этому существует множество примеров, среди которых, в частности, южная часть Тирренского моря [Chiarabba et al., 2008] и Камчатка [Nurmukhamedov et al., 2016]. С окружающей средой это состояние обладает контрастом одновременно плотностных и геоэлектрических свойств, что формирует аномальное отображение таких зон как в поле вариаций скоростей S-волн по данным сейсмотомографии (рис. 1, а) [Schaeffer, Lebedev, 2013], так и в данных проводимости литосферы и астеносферы (рис. 1, б) [Zhdanov et al., 1988; Alekseev et al., 2015]. Модели объемного распределения проводимости в мантии, которые можно сопоставить с объемными моделями сейсмотомографии, к настоящему времени не созданы, но интегральная модель проводимости литосферы [Alekseev et al., 2015] может быть включена в набор поверхностных характеристик для сопоставления с глубинным состоянием. Это обусловлено тем, что флюидный аспект глубинных аномалий томографии может подтверждаться литосферными аномалиями проводимости. Мелкомасштабная детальность томографической модели для комплексного сопоставления с проводимостью нуждается в использовании модели со сходной детальностью, которая присутствует в работе [Alekseev et al., 2015].

Вулканогенные области, имеющие важное значение для геодинамических процессов на территории России, сосредоточены в основном вдоль Альпийского и Урало-Монгольского поясов, а также вдоль южного обрамления Сибирской платформы с выходом на Курильскую гряду. Для анализа глубинной геодинамики вдоль этих объектов было определено положение субширотного профиля (рис. 1), вдоль которого были рассчитаны разрезы объемных сейсмотомографических моделей Р- и S-волн, атрибута отношения скоростей $\delta(V_P/V_S)$, построен график электропроводности литосферы и проведено сравнение с данными сейсмичности и теплового потока. Перечисленные параметры имеют геодинамический смысл, сопоставимы с глубинным состоянием, но не в полной мере коррелируют между собой. Существуют разные факторы, приводящие к появлению положительных или отрицательных аномальных форм рассматриваемых параметров. Их сопоставление друг с другом дает возможность для комплексной интерпретации глубинного геодинамического состояния выбранных объектов, сходства и различий между ними, а так-

же понимания связи активных поверхностных процессов с глубинными. Для анализа контрастных геодинамических обстановок положение профиля было определено таким образом, чтобы для сравнения охватить геодинамически активные зоны, прилегающие к территории России с включением океанического обрамления Евразии.

2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ СЕЙСМОТОМОГРАФИИ

Подавляющее большинство активных в настоящее время вулканов расположено над зонами с отрицательными вариациями скоростей S-волн (рис. 1, а). Сопоставление их расположения с аномалиями вариаций скоростей на глубине 75 км по данным [Schaeffer, Lebedev, 2013] показывает, что вдоль южного обрамления России вулканогенные области подчиняются этому правилу. Исключение для среза на этой глубине составляет вулканогенная область северо-запада Китая, но она сопоставляется с отрицательными аномалиями на глубинах около 300 км. Та же причина объясняет отсутствие на срезе 75 км отрицательных аномалий под группой вулканов Африканской рифтовой системы южнее экватора. Таким образом, области частично расплавленной и разуплотненной мантии, питающие магмой действующие вулканы, в современных сейсмотомографических данных с высоким разрешением фиксируются во всех случаях вулканической активности. Аномалии вариации скоростей S-волн отрицательного знака интерпретируются как следствие прогретого и частично расплавленного состояния недр [Becker, Boschi, 2002]. Эта интерпретация условно называется термальной, а аномалии – «горячими». Рис. 1, а, также указывает на возможность формирования «горячих» аномалий в коллизийных зонах за счет повышенной макротрещиноватости коры и верхней мантии складчатых поясов, что следует также из данных для глубин 25 и 50 км [Schaeffer, Lebedev, 2013]. Кроме того, «горячие» области на срезе 75 км фиксируются в надсубдукционном пространстве, которое вдоль своего обрамления содержит плотные кластеры действующих вулканов.

Принципиальный характер расхождения аномалий скорости S-волн δV_S [Grand et al., 1997] и Р-волн δV_P [Van der Hilst et al., 1997] в верхней мантии обсуждался в работе [Sokolov, 2014]. Особо отмечался факт затухания осевой «горячей» аномалии Срединно-Атлантического хребта (САХ) на глубинах свыше ~300 км в поле δV_S . Отсутствие глубоких корней САХ достоверно выявлялось по данным сейсмотомографии уже с конца 1980-х годов [Anderson et al., 1992]. В работе [Schaeffer, Lebedev, 2013] глубина осевой

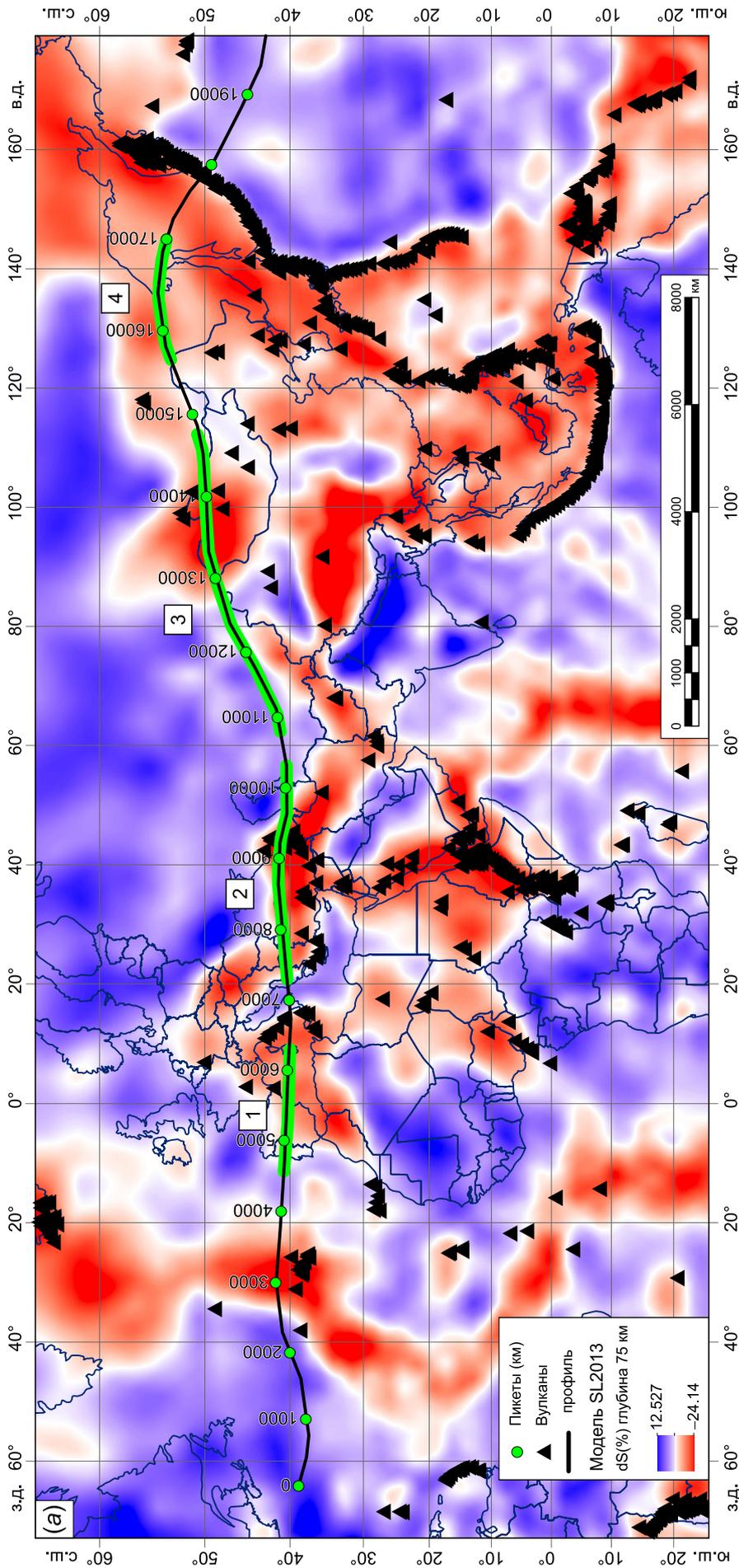


Рис. 1. Положение субширотного профиля через Евразию вдоль южного обрамления России с захватом океанических окраин и современные вулканогенные области. Точками с номерами указаны пикеты профиля, кратные 1000 км, для сопоставления их положения с разрезом рис. 2. Выделенные жирными линиями фрагменты профиля с номерами соответствуют зонам внутриплитной сейсмичности рис. 2. (а) – горизонтальный срез вариаций скоростей S-волн сейсмографической модели SL2013sv [Schaeffer, Lebedev, 2013] на глубине 75 км; (б) – карта интегральной проводимости литосферного слоя по данным [Alekseev et al., 2015].

Fig. 1. Position of the sublatitudinal profile across Eurasia, including oceanic margins and modern volcanogenic areas. The profile is constructed along the southern border of Russia. Numbered points – profile reference points (every 1000 km) for correlation with the cross-section (see Fig. 2). The numbered profile fragments (thick lines) correspond to the intraplate seismicity zones shown in Fig. 2. (a) – horizontal section of the S-wave velocity variations in seismotomographic model SL2013sv [Schaeffer, Lebedev, 2013] at a depth of 75 km. (б) – integrated conductivity map of the lithospheric layer (after [Alekseev et al., 2015]).

аномалии САХ определяется в 150 км. Из вариаций поля δV_P следует, что с глубиной характер аномалий δV_P и δV_S становится более схожим, но сохраняются существенные различия под геодинамически активными районами – коллизионными зонами, районами внутриплитного магматизма и деформаций и зоной САХ. Наличие объемных моделей по разным типам волн со сходной и равномерной детальностью создает возможность расчета сейсмического параметра, основанного на отношении скоростей Р- и S-волн. В расчете атрибута с отношением параметров важным элементом является сходство детальности полей, участвующих в расчете. В настоящей работе для Атлантического-Евразийского разреза (рис. 1) используется подход и результат, полученный в работе [Sokolov, 2014]. На основе указанного критерия детальности и доступных в сети источников (<https://ds.iris.edu/spud/earthmodel>) был сделан выбор моделей: NGRAND [Becker, Boschi, 2002; Grand et al., 1997] для S-волн и HWE97P [Van der Hilst et al., 1997] для Р-волн. Обе модели представлены коэффициентами сферических гармоник до 31-го порядка. Параметризация обеих моделей проводилась для блоков с горизонтальными размерами $2 \times 2^\circ$ с переменными глубинами. Шаг по глубине составлял в среднем 80 км до глубин 400 км, 120 км – от 400 до 1000 км, 150 км – от 1000 до 2400 км и далее до ядра по 250 км. Всего в расчете было 22 интервала для обоих типов волн. В настоящее время существуют более детальные глобальные модели [Schaeffer, Lebedev, 2013], но они различаются по детальности и плотности данных для разных типов волн. Атрибут $\delta(V_P/V_S)$ в работе [Sokolov, 2014] интерпретируется как показатель геодинамической подвижности среды, максимумы которого указывают на состояние мантии, близкое к эффективно жидкому из-за значений коэффициента Пуассона, обеспечивающих наличие экстремумов.

3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПРОВОДИМОСТИ

Геоэлектрические исследования методом МТЗ в переходной зоне океан – континент через Сахалин, Охотское море, Курильскую гряду с выходом в Тихий океан [Zhdanov et al., 1988] показали, что астеносфера – область мантии, являющаяся ключевой для геодинамики плит, обладает повышенной проводимостью по сравнению с литосферой и более глубокой мантией. Кроме того, повышенной проводимостью обладает зона субдукции, предположительно содержащая затянутае обводненные осадочные комплексы и токопроводящие каналы под Курильской дугой. Этот объект повышенной проводимостью отличается от астеносферного, хотя частично

связан также с наличием разогретого вещества, составляющего расплав. В отличие от гравитационных или магнитных геофизических полей, которые давно и с хорошей детальностью измерены для всей поверхности Земли, полная модель ее электропроводности появилась сравнительно недавно. Первой глобальной сборкой этого параметра из отдельных зондирований и геометрии оболочек Земли является работа [Everett et al., 2003]. В настоящем исследовании использовалась более современная модель 3D-Conductivity [Alekseev et al., 2015], построенная на сетке $1 \times 1^\circ$ для глобального сферического слоя 0–100 км путем вертикального интегрирования моделей глубин основных оболочек с заданными значениями проводимости и максимально полно использующая региональные геоэлектрические съемки и данные о коровых аномалиях. Эти съемки наиболее развиты для территорий России и Северной Америки. Целью создания авторами этой модели [Alekseev et al., 2015] являлся учет влияния проводимости поверхностной оболочки Земли в исследованиях ионосферных источников электромагнитных полей. Но поскольку это единственная модель в своем классе, описывающая глобальное распределение усредненной вертикальной электропроводности с указанной детальностью, она была применена для комплексной интерпретации геофизических параметров, имеющих геодинамический смысл.

На рис. 1, б, показано положение субширотного профиля через Евразию с проводимостью литосферного слоя по данным [Alekseev et al., 2015] в качестве топоосновы. Океанические области представлены максимальными значениями проводимости, которая показана на карте величинами десятичного логарифма Om^{-1} . Также видно, что повышенное значение проводимости наблюдается в тех зонах, где в разрезе литосферы присутствуют мощные осадочные комплексы. Основная область на южном обрамлении России с вулканическими образованиями сосредоточена в пределах $0.002\text{--}0.008 \text{ Lg}(\text{Om}^{-1})$ и будет показана на разрезе отдельным графиком. Поскольку основная вариабельность использованных значений проводимости отражает свойства поверхностной обложки, ее сопоставление с глубинными параметрами позволит определить наличие или отсутствие связи аномального поля с глубинными источниками, выделяемыми по данным томографии и обоснованными флюидным фактором [Letnikov, 2006].

4. ВАРИАЦИЯ V_P/V_S НА АТЛАНТИЧЕСКО-ЕВРАЗИЙСКОМ РАЗРЕЗЕ

Атлантическо-Евразийский профиль (рис. 1, а) расположен субширотно в полосе от $\sim 40^\circ$ до $\sim 54^\circ$

с.ш. от северо-западной части Атлантического океана через САХ, Средиземное море, Кавказ, Среднюю Азию, Байкал, южную часть Охотского моря, Курильскую дугу и выходит в Тихий океан. Он пересекает все типы геодинамически активных районов – коллизионные зоны, районы внутриплитного магматизма, зоны дивергентных границ и субдукции. Разрез δV_S (рис. 2, п. 5) [Letnikov, 2006] по данному профилю подтверждает, что при вертикальном отображении значений этого параметра отрицательные «горячие» аномалии различной интенсивности присутствуют под проявлениями новейшего вулканизма в континентальной части. Около САХ в поверхностном слое 0–300 км присутствует интенсивная «горячая» аномалия, связанная с прогретым и частично расплавленным веществом [Dmitriev et al., 1999]. Остальное пространство мантии под САХ представлено слабым полем в пределах $\pm 0.5\%$, не содержащим фокусированного восходящего потока под дивергентной границей. Далее на восток вплоть до Байкала мантия представлена преимущественно положительным, условно «холодным» полем с редкими линзами «горячего» вещества. К Тихому океану «горячие» линзы встречаются чаще. Горизонтальный срез модели NGRAND [Becker, Boschi, 2002; Grand et al., 1997] для S-волн над разделом мантия – ядро показывает, что распространение области влияния Африканского суперплюма на север более продвинуто, чем у Тихоокеанского. Это также объясняет тот факт, что субширотный разрез атрибута (рис. 2, п. 7) в нижней мантии в атлантическом участке разреза еще пересекает корень плюма, а на тихоокеанском участке разрез пересекает только ответвления от суперплюма, расходящиеся вверх в конусообразной области.

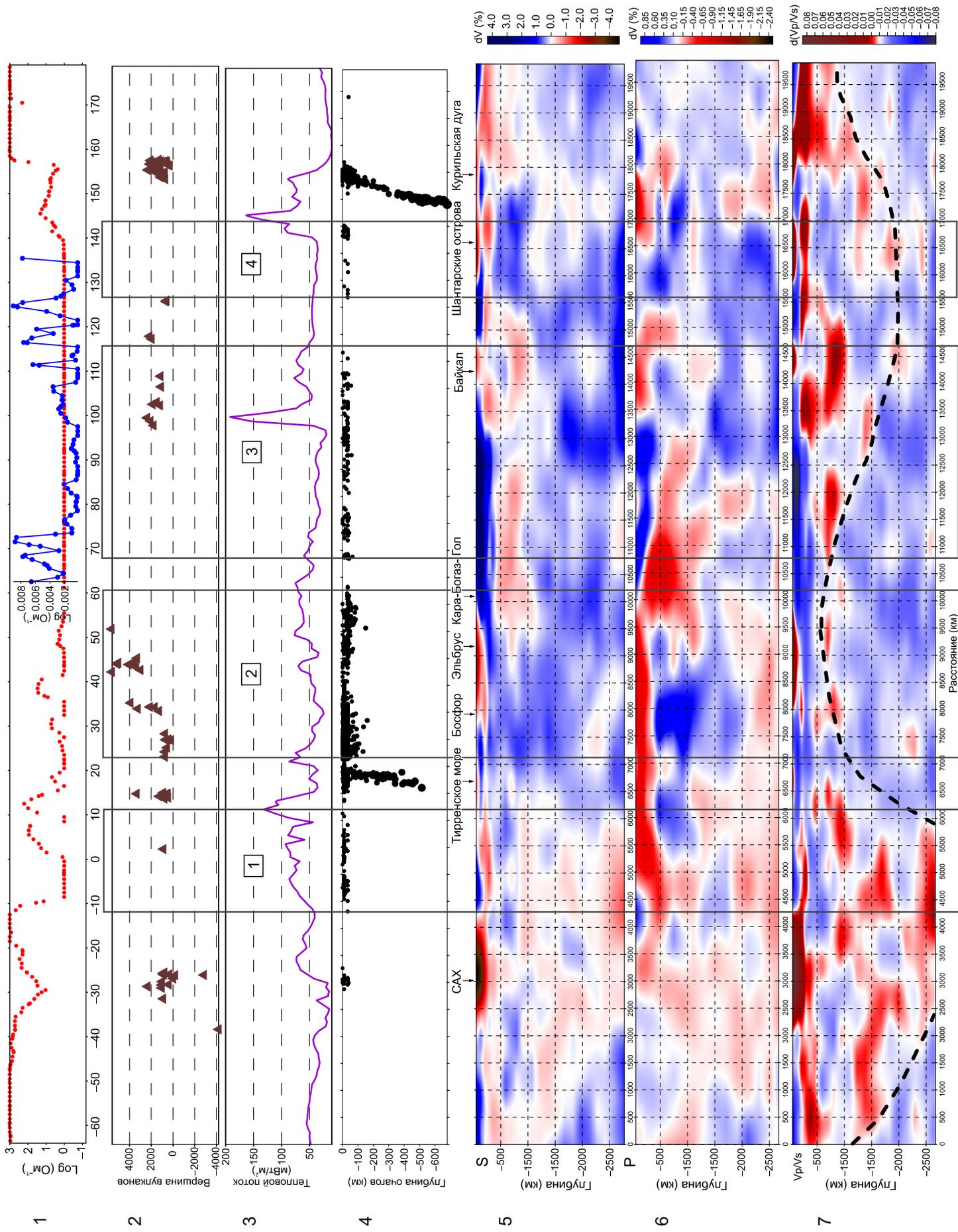
Разрез мантии δV_P (рис. 2, п. 6) по модели HWE97P [Van der Hilst et al., 1997] для P-волн в западной части в целом повторяет характер поля δV_S , но в восточной части, а также в поверхностном слое 0–400 км в коллизионном Альпийском поясе наблюдается интенсивная «горячая» аномалия. Эта аномалия в Средней Азии смещается в глубину в интервал 300–700 км, а на поверхности появляется «холодная» аномалия, расположенная в тылу коллизионной зоны. Подобный характер аномалий δV_P согласуется с корреляцией между δV_P и δV_S [Becker, Boschi, 2002], которая более или менее выдержана для глубоких объемов мантии, но в поверхностном слое уменьшается. По-видимому, P-волны в ряде случаев в большей степени отражают напряженное состояние литосферы, поскольку амплитуды аномалий в коллизионных зонах превосходят амплитуды в глубокой мантии, где в формировании аномалий играет роль термальное состояние.

Разрез атрибута «подвижности» $\delta(V_P/V_S)$ (рис. 2, п. 7) [Sokolov, 2014] обладает особенностями, кото-

рые не видны на разрезах δV_P и δV_S . Первая особенность заключается в том, что линзы положительных аномалий атрибута представлены более контрастными значениями, чем «горячие» аномалии на разрезах δV_P и δV_S . Более четко прослеживаются перемены между линзами, по которым может происходить миграция флюида, формирующего «подвижность». Это позволяет сделать предположение о наличии непрерывной сети связей между линзами от низов мантии до вулканических построек на поверхности. Отметим, что интенсивные положительные аномалии подвижности присутствуют под районами новейшего вулканизма, которые пересекает профиль. Вторая особенность атрибута состоит в том, что контрастные линзы концентрируются около двух конусообразных областей, расширяющихся к верхним отделам мантии. Эти области оконтурены пунктиром на рис. 2, п. 7. Их сравнение с положением Африканского и Тихоокеанского суперплюмов [Sokolov, 2014] показывает, что на разрезе имеет место сечение северных ответвлений суперплюмов, центры которых расположены почти на 4000 км южнее экватора. Отсюда следует, что основная «подвижность» вдоль профиля геометрически сконцентрирована около ответвлений суперплюмов.

5. СОПОСТАВЛЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ С ВАРИАЦИЯМИ V_P/V_S

Группы вулканических образований Байкальского района и Дальнего Востока (рис. 2, п. 2) ассоциированы в пространстве с аномалиями теплового потока 150–200 мВт/м² (рис. 2, п. 3), что почти в три раза выше фоновых значений. График теплового потока был получен вдоль профиля сечением грида, рассчитанного интерполяцией методом «кригинг» по данным [Pollack et al., 1993; Podgornykh, Khutorskoy, 1997; Global Heat Flow Database, 2018] на сетку $1 \times 1^\circ$. В связи с этим необходимо отметить, что интерполированные значения могут занижать значения отдельных точечных замеров. Дальневосточные вулканы связаны с надсубдукционной зоной, где аномалии теплового потока можно объяснить совокупностью процессов этой геодинамической обстановки. Вулканическая система Байкальского региона является внутриплитной, но связана с не менее интенсивной аномалией теплового потока. Альпийско-Средиземноморская группа вулканов также ассоциирована с повышенными значениями теплового потока, но в Черноморско-Кавказском сегменте тепловой поток не сильно превышает фоновый. Небольшое исключение составляет надсубдукционная зона Тирренского моря. То же имеет место в районе пересечения с САХ,



←

Рис. 2. Мультипараметрический разрез вдоль Атлантическо-Евразийского профиля. Положение профиля показано на рис. 1. Цифрами в квадратах обозначены сегменты с разной внутриплитной активностью. 1 – график проводимости литосферы по данным [Alekseev et al., 2015]. В отдельном графике вдоль южного обрамления России показаны низкие значения континентальной части профиля. По горизонтальной оси – значения проекции отсчетов на ось долгот в градусах. 2 – гипсометрическое положение вершин вулканов, находящихся в полосе 200 км от профиля. 3 – график теплового потока, построенный сечением грида, рассчитанного по данным [Pollack et al., 1993; Podgornykh, Khutorskoy, 1997; Global Heat Flow Database, 2018]. 4 – сейсмичность по данным [ANSS..., 2014] в полосе 200 км от линии профиля в проекции на ось глубин. 5 – разрез δV по S-волнам [Grand et al., 1997; Becker, Boschi, 2002] по Атлантическо-Евразийскому профилю. 6 – разрез δV по P-волнам [van der Hilst et al., 1997] по Атлантическо-Евразийскому профилю. 7 – разрез атрибута $\delta(V_P/V_S)$ по Атлантическо-Евразийскому профилю по данным [Sokolov, 2014]. Пунктиром показано сечение разрезом конусообразных областей суперплюмов, расширяющихся к верхним отделам мантии от границы с ядром.

Fig. 2. Multi-parameter cross-section along the Atlantic-Eurasian profile. The profile position is shown in Fig. 1. Numbers in squares – segments differing in intraplate activity. 1 – lithosphere conductivity curve (after [Alekseev et al., 2015]). A separate graph along the southern border of Russia shows low values for the continental part of the profile. Horizontal axis – reflection projections on the longitude axis in degrees. 2 – hypsometric position of the volcanic peaks located in the zone 200 km away from the profile. 3 – heat flux curve (based on the grid cross-section) calculated from the data published in [Pollack et al., 1993; Podgornykh, Khutorskoy, 1997; Global Heat Flow Database, 2018]. 4 – seismicity (after [ANSS..., 2014] in the band 200 km away from the profile line (projection to the depth axis). 5 – section δV for S-waves [Grand et al., 1997; Becker, Boschi, 2002] along the Atlantic-Eurasian profile. 6 – section δV for P-waves [van der Hilst et al., 1997] along the Atlantic-Eurasian profile. 7 – cross-section of attribute $\delta(V_P/V_S)$ for the Atlantic-Eurasian profile (after [Sokolov, 2014]). Dashed line – cross-section of the cone-shaped areas of superplumes expanding toward the upper mantle from the boundary with the core.

но в этой обстановке объективные неискаженные значения теплового потока из-за конвективного выноса тепла гидротермальной циркуляцией вряд ли возможны.

Все вулканические группы связаны с отрицательными аномалиями вариаций скоростей S-волн (рис. 2, п. 5), в особенности САХ, поскольку профиль пересекает его в районе Азорского плюма. Но более очевидна эта связь на вариациях P-волн (рис. 2, п. 6). Контрастные минимумы томографии в восточной части разреза, сопоставимые с аномалиями теплового потока, указывают на их глубинное происхождение – до 1000 км. Интенсивность вариаций P-волн в Альпийско-Средиземноморском сегменте профиля заметно выше, чем в восточной части разреза, но при этом у нее отсутствуют аналогичные глубинные корни. Это говорит о том, что аномальная «горячая» мантия подходит к региону с юга от профиля. В частности, при анализе среза на глубине 75 км (см. рис. 1, а) видно, что этот регион, находящийся на южном обрамлении структурного «холодного» барьера Восточно-Европейского кратона, является пределом для распространения растекающейся на север Афарской ветви Африканского суперплюма [Trifonov, Sokolov, 2017]. Последняя является глубинным источником для магматических систем Красного моря, Леванта и Кавказа [Sokolov, Trifonov, 2012] и около структурного барьера, по всей видимости, разворачивается на запад.

На атрибуте вариации V_P/V_S (рис. 2, п. 7) появляется контрастное выделение глубинной «горячей»

зоны под Байкальским районом и Шантарскими островами. Прогретые области под субдукционными зонами в P- и S-волнах, как на западе (Тирренское море), так и на востоке разреза (Курильская дуга) теряют выраженность. Обособляется «горячая» линза под Кавказом. Интересным моментом можно считать появление четких перемычек между «горячими» линзами. Эти перемычки указывают на возможное перетекание флюидов к поверхности от глубинных источников, которыми являются Тихоокеанский и Африканский суперплюмы. В районе Средиземноморья и Кавказа возможно слияние и перемешивание флюидов и частично расплавленного вещества от обоих плюмов, но в приповерхностной части разреза их разделяет холодный блок Средней Азии. Тем не менее пути миграции могут быть расположены вне плоскости разреза.

Сопоставление зон проявлений вулканизма с проводимостью литосферы (рис. 2, п. 1) указывает на наличие положительных аномалий этого параметра во всех вулканических кластерах, под которыми в мантии имеются глубинные «горячие» аномалии в P-, S-волнах и атрибуте $\delta(V_P/V_S)$. Отрицательная аномалия в районе САХ указывает на сокращение мощности высокопроводящего водного слоя, а не на проводимость астеносферы, расположенной неглубоко под осевой зоной. Поскольку модели проводимости без водного слоя в настоящий момент нет, оценить ее значение в зоне САХ затруднительно. Альпийско-Средиземноморская и Кавказская группы вулканов сопоставимы с положитель-

ными аномалиями проводимости (рис. 2, п. 1), убывающими по амплитуде в восточном направлении от Тирренского моря. Курильской группе вулканов также соответствует повышенное значение проводимости [Zhdanov et al., 1988], но на графике (рис. 2, п. 1) она представлена минимумом по сравнению с Тихоокеанской акваторией по той же причине, что и для САХ: сокращение мощности водного слоя. В пределах охотоморской части континентальной окраины, тем не менее, наблюдается положительная аномалия проводимости. В континентальной части разреза все вулканические группы с положительными аномалиями проводимости сопоставляются с отрицательными аномалиями сейсмических скоростей. При этом Альпийско-Средиземноморская и Кавказская группы представлены более интенсивным аномальным полем в Р-волнах. Единственной группой, имеющей сходное аномальное отображение в обоих типах волн, является Байкальская. Ей соответствует аномальная группа экстремумов на графике проводимости, показанная отдельным увеличенным диапазоном малых значений для континентальной части. Интересно, что аналогичное поведение проводимости отмечается для Средней Азии в интервале без современных вулканических построек между зонами 2 и 3 (рис. 2). Кроме этой группы аномалий проводимости, все остальные имеют в сейсмотомографическом отображении «горячие» корни в верхней мантии до глубин 1200 км. Эти факты можно интерпретировать как физически непротиворечивую цепочку явлений, выраженных в различных геофизических полях, от глубинных «горячих» источников в мантии до зон подъема вещества и формирования вулканических групп на поверхности с интегральным по литосфере положительным полем проводимости.

Наибольшие максимумы на детальном графике проводимости (рис. 2, п. 1) тяготеют к Байкальской рифтовой зоне, в которой детальными исследованиями [Moroz Yu.F., Moroz T.A., 2012] подтверждено наличие высокопроводящего слоя в средней части литосферы на глубинах от 40 до 50 км. Этот район отличается сильной сейсмичностью [Melnikova, Radziminovich, 1998; Kuchai, Kozina, 2015]; непосредственно в Байкальском рифте преобладает режим растяжения, который к западу и востоку от Байкала меняется на сдвиговый. Это указывает на то, что существенная часть сейсмических событий связана не с подъемом разогретого вещества ветвей плюма, а с горизонтальным сдвиговым движением плит или их фрагментов, которое при не прямой конфигурации разрыва создает локальные структуры растяжения.

Интересным фактом является наличие положительных аномалий проводимости в двух зонах отсутствия сильной внутриплитной сейсмичности

(рис. 2, п. 4) между сегментами 2 и 3, 3 и 4. Это может указывать на то, что некоторые наиболее прогретые и пластичные проводящие участки верхней мантии в меньшей степени способны формировать условия для накопления больших напряжений на внутриплитном пространстве. Сейсмичность около САХ и в субдукционных зонах не является внутриплитной и сосредоточена на границах плит разной природы. Собственно внутриплитная сейсмичность вдоль профиля (рис. 2, п. 4) условно группируется в четыре сегмента, разделенные асейсмичными интервалами или границами плит за исключением интервала между сегментами 1 и 2, в котором расположен Средиземноморский слэб. Зона 1 в Западном Средиземноморье и на Иберийском полуострове представлена событиями Азоро-Гибралтарского порога и связанными с ним кластерами землетрясений, расположенными к северу от него, с почти асейсмичным интервалом в западной части Тирренского моря. Вдоль профиля показана сейсмичность, собранная в интервале ± 200 км, в связи с чем активность Азоро-Гибралтарского порога влияет на график рис. 2, п. 4. Зона 2 внутриплитной сейсмичности (рис. 2, п. 4) простирается от Адриатического моря через Балканы, Турцию, Кавказ и Каспийское море до Средней Азии. В целом она представлена глубокофокусными (до 100 км) событиями, которые имеют минимальную глубину ~ 30 км около отметки 8500 км на профиле (центр Черного моря) и возрастают на запад и восток до 100 км. Это может косвенно указывать на корректность схемы растекания Афарского ответвления Африканского суперплюма вдоль южного обрамления «холодного» структурного барьера [Trifonov, Sokolov, 2018]. Зона 3 внутриплитной сейсмичности простирается от Средней Азии до Забайкалья и представлена событиями с коровыми глубинами до 50 км. Зона 4 в районе Шантарских островов имеет аналогичную характеристику. Из приведенного анализа следует, что распределение эпицентров меняется в зависимости от пересечения линией наблюдения ветвей суперплюмов, растекающихся непосредственно под литосферой в западной части профиля и формирующих «горячие» линзы на всем пространстве профиля.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивные положительные аномалии атрибута $\delta(V_p/V_s)$ присутствуют под районами новейшего вулканизма Евразии. Субширотный разрез атрибута вдоль Атлантическо-Евразийского профиля показывает сложную конфигурацию пространственных вертикальных и латеральных каналов, подводящих флюид или прогретое вещество с глубины на поверхность. Контрастные линзы ат-

рибута концентрируются около двух конусообразных областей, расширяющихся к верхним отделам мантии. Эти области образованы пересечением плоскости разреза с ответвлениями Африканского и Тихоокеанского суперплюмов, центры которых расположены почти на 4500 км южнее положения профиля. Аномальные зоны атрибута в пределах разреза через районы новейшего вулканизма российской части Евразии являются конечными элементами цепочки линз и перемычек, связанных с глубинными частями суперплюмов с субэкваториальными корнями. На атрибуте $\delta(V_p/V_s)$ проявлена контрастная «горячая» зона под Байкальским регионом и Шантарскими островами, но последняя не имеет современного вулканизма. Тем не менее к северу и югу от островов располагаются области позднекайнозойского магматизма.

Группы вулканических образований Байкальского региона и Дальнего Востока ассоциируются в пространстве с аномальными значениями теплового потока, равными 150–200 мВт/м², что в три раза выше фоновых значений. Альпийско-Средиземноморская группа вулканов также ассоциирована с повышенными значениями теплового потока, однако в Черноморско-Кавказском сегменте тепловой поток не сильно превышает фоновый.

Все вулканические группы связаны с глубинными отрицательными аномалиями вариаций скоростей S- или P-волн, которые в восточной части разреза расположены до глубин 1000 км и коррелируют с аномалиями теплового потока, указывая на глубинный тип источника. Интенсивность вариаций P-волн в Альпийско-Средиземноморском сегменте профиля заметно выше, чем в восточной части разреза, но при этом у нее отсутствуют аналогичные глубинные корни, что указывает на боковое продолжение аномальной «горячей» мантии от Афарской ветви Африканского суперплюма.

Сопоставление внутриплитного вулканизма с проводимостью показывает наличие положительных аномалий во всех вулканических кластерах несмотря на сильно отличающиеся по уровню фоновые значения. Исключение составляют вулканы в пределах экваторий, где из-за сильного эффекта водного слоя не удается подтвердить эту закономерность. В континентальной части разреза все вулканические группы с положительными аномалиями проводимости сопровождаются аномалиями скоростей. Единственной группой, имеющей сходное аномальное отображение в обоих типах волн,

является Байкальская. Все вулканические группы, кроме Альпийско-Кавказской, имеют в сейсмографическом отображении «горячие» корни в верхней мантии до глубин 1200 км. Наблюдается ряд явлений, выраженных в различных геофизических полях, от глубинных «горячих» источников в мантии до зон подъема вещества и формирования вулканических групп на поверхности с интегральным по литосфере положительным полем проводимости.

Наибольшие максимумы проводимости в континентальной части привязаны к зонам отсутствия сильной внутриплитной сейсмичности, поскольку наиболее прогретые и пластичные проводящие участки верхней мантии в меньшей степени формируют условия для накопления больших напряжений в литосфере. Внутриплитная сейсмичность вдоль профиля группируется в несколько зон, разделенных асейсмичными интервалами или границами плит. В пределах этих зон сейсмичность представлена в основном коровыми событиями до глубин ~50 км. Исключение составляет зона от Адриатического моря через Турцию, Кавказ до Средней Азии. В целом она представлена глубокофокусными (до 100 км) событиями, которые имеют привязку к Афарскому ответвлению Африканского суперплюма вдоль южного обрамления «холодного» структурного барьера Восточно-Европейской платформы.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен В.В. Ярмолюку за советы и замечания к рукописи, М.Д. Хуторскому и Б.Г. Поляку – за обсуждение вопросов осреднения измерений теплового потока, Н.А. Пальшину, Д.А. Алексееву и А.В. Кувшинову – за обсуждение вопросов, связанных с особенностями глобальной модели проводимости, и предоставление цифровой версии модели. Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 15 «Природные катастрофы и адаптационные процессы в условиях изменяющегося климата и развития атомной энергетики»; анализ данных об опасных геологических явлениях частично выполнен в рамках темы госзадания № 0135-2016-0013 Геологического института РАН «Опасные геологические процессы в Мировом океане: связь с геодинамическим состоянием коры и верхней мантии и новейшими движениями в океане».

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Alekseev D., Kuvshinov A., Palshin N., 2015. Compilation of 3D global conductivity model of the Earth for space weather applications. *Earth, Planets and Space* 67 (1), 108. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0272-5>.

- Anderson D.L., Tanimoto T., Zhang Y.S., 1992. Plate tectonics and hotspots: the third dimension. *Science* 256 (5064), 1645–1651. <https://doi.org/10.1126/science.256.5064.1645>.
- ANSS Earthquake Composite Catalog, 2014. Available from: <http://quake.geo.berkeley.edu/anss/> (last accessed: February 11, 2014).
- 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>.
- Chiarabba C., De Gori P., Speranza F., 2008. The southern Tyrrhenian subduction zone: deep geometry, magmatism and Plio-Pleistocene evolution. *Earth and Planetary Science Letters* 268 (3–4), 408–423. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.01.036>.
- Dmitriev L.V., Sokolov S.Yu., Melson V.G., O'Hearn T., 1999. Plume and spreading association of basalts and their reflection in the petrological and geophysical parameters of the northern Mid-Atlantic Ridge. *Russian Journal of Earth Sciences* 1 (6), 457–476 (in Russian) [Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю., Мелсон В.Г., О'Хирн Т. Плюмовая и спрединговая ассоциация базальтов и их отражение в петрологических и геофизических параметрах северной части Срединно-Атлантического хребта // *Российский журнал наук о Земле*. 1999. Т. 1. № 6. С. 457–476].
- Everett M.E., Constable S., Constable C.G., 2003. Effects of near-surface conductance on global satellite induction responses. *Geophysical Journal International* 153 (1), 277–286. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01906.x>.
- 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., Widiyantoro S., 1997. Global seismic tomography: A snapshot of convection in the Earth. *GSA Today* 7 (4), 1–7.
- Kuchai O.A., Kozina M.E., 2015. Regional features of seismotectonic deformations in East Asia based on earthquake focal mechanisms and their use for geodynamic zoning. *Russian Geology and Geophysics* 56 (10), 1491–1499. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.011>.
- Letnikov F.A., 2006. Superdeep fluid systems of the Earth. RFBR Electronic Library (in Russian) [Летников Ф.А. Сверхглубинные флюидные системы Земли. Электронная библиотека РФФИ. 2006]. Available from: https://www.rffi.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_16705.
- Melnikova V.I., Radziminovich N.A., 1998. Mechanisms of action of earthquake foci in the Baikal region over the period 1991–1996. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 39 (11), 1598–1607.
- Moroz Yu.F., Moroz T.A., 2012. Deep geoelectric section of the Baikal rift. *Bulletin of Kamchatka Regional Association Educational-Scientific Center. Earth Sciences* (2), 114–126 (in Russian) [Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Глубинный геоэлектрический разрез Байкальского рифта // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. 2012. № 2. С. 114–126].
- Nurmukhamedov A.G., Nedyadko V.V., Rakitov V.A., Lipatyev M.S., 2016. The lithosphere boundaries in Kamchatka based on data on the earthquake converted-wave method (ECWM). *Bulletin of Kamchatka Regional Association Educational-Scientific Center. Earth Sciences* (1), 35–52 (in Russian) [Нурмухамедов А.Г., Недядько В.В., Ракитов В.А., Липатьев М.С. Границы литосферы на Камчатке по данным метода обменных волн землетрясений // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. 2016. № 1. С. 35–52].
- Podgornykh L.V., Khutorskoy M.D., 1997. Planetary Heat Flow Map. Scale 1:30000000. Explanatory Note. Orgservis LTD Publishing House, Moscow – St. Petersburg, 55 p. (in Russian) [Подгорных Л.В., Хуторской М.Д. Карта планетарного теплового потока. Масштаб 1:30 000 000. Объяснительная записка. М.–СПб.: Изд-во «Оргсервис ЛТД», 1997. 55 с.].
- Pollack H.N., Hurter S.J., Johnson J.R., 1993. Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set. *Reviews of Geophysics* 31 (3), 267–280. <https://doi.org/10.1029/93RG01249>.
- Schaeffer A.J., Lebedev S., 2013. Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone. *Geophysical Journal International* 194 (1), 417–449. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt095>.
- Sokolov S.Yu., 2014. Condition of geodynamic mobility in mantle based on data from seismic tomography and P and S waves velocity ratio. *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 P и S волн // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. 2014. № 2. С. 55–67].
- Sokolov S.Yu., Trifonov V.G., 2012. Role of the asthenosphere in transfer and deformation of the lithosphere: The Ethiopian-Afar superplume and the Alpine-Himalayan Belt. *Geotectonics* 46 (3), 171–184. <https://doi.org/10.1134/S0016852112030053>.
- Trifonov V.G., Sokolov S.Y., 2017. Sublithospheric flows in the mantle. *Geotectonics* 51 (6), 535–548. <https://doi.org/10.1134/S0016852117060085>.
- Trifonov V.G., Sokolov S.Yu., 2018. Structure of the mantle and tectonic zoning of the central Alpine-Himalayan belt. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (4), 1127–1145 (in Russian) [Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. Строение мантии и тектоническая зональность центральной части Альпийско-Гималайского пояса // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 4. С. 1127–1145]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0386>.
- 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>.

Zhdanov M.S., Berdichevsky M.N., Shneer V.S., Svetov B.S., Varentsov I.M., Zhdanova O.N., Golubev N.G. Geoelectric model of the transition zone from the Asian continent to the Pacific Ocean. In: Yu.P. Neprochnov, L.R. Merklin (Eds.), Geophysical fields of the Pacific and Indian oceans. International Geophysical Committee, USSR Acad. Sci., Moscow, p. 45–52 (in Russian) [Жданов М.С., Бердичевский М.Н., Шнеер В.С., Светов Б.С., Варенцов И.М., Жданова О.Н., Голубев Н.Г. Геоэлектрическая модель зоны перехода от Азиатского материка к Тихому океану // Геофизические поля Тихого и Индийского океанов / Ред. Ю.П. Непрочнов, Л.Р. Мерклин. М.: МГК АН СССР, 1988. С. 45–52].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ | INFORMATION ABOUT AUTHOR**Сергей Юрьевич Соколов**

канд. физ.-мат. наук, в.н.с.

Геологический институт РАН
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия✉ e-mail: sysokolov@yandex.ru**Sergei Yu. Sokolov**

Candidate of Physics and Mathematics, Lead Researcher

Geological Institute of RAS
7 Pyzhevsky lane, Moscow 119017, Russia