

УДК 551.8+550.383+550.384+551.211

## ЭВОЛЮЦИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПЛЮМОВЫЙ МАГМАТИЗМ В ПРИЛОЖЕНИИ К ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМ РЕКОНСТРУКЦИЯМ В АБСОЛЮТНЫХ КООРДИНАТАХ

Д.В. Метелкин<sup>1,2</sup>, Е.В. Виноградов<sup>1,2</sup>, А.А. Елисеев<sup>1,2</sup>, М.Е. Лузан<sup>1,2</sup>, В.В. Абашев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

<sup>2</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>3</sup>Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Россия

Представлен анализ современных палеомагнитных данных по крупным изверженным провинциям и потенциально связанным с плюмами палеорифтовым структурам Сибири и высокоширотной Арктики. Обсуждается взаимная связь плюмового магматизма с изменением таких характеристик геомагнитного поля как частота инверсий и его абсолютная величина за последние 600 млн лет. Показана периодичность в 70 – 100 млн лет. Периодам активизации плюмов предшествует рост частоты инверсий, который сопровождается падением напряженности геомагнитного поля. Предложена гипотеза, объясняющая этот эффект режимом тепловой конвекции во внешнем ядре, плюмы рассматриваются как регулятор состояния гидромагнитного динамо. При «перегреве» ядра повышалась турбулентность конвективных течений, соответственно, росло количество инверсий, при которых величина главной составляющей геомагнитного поля – аксиальный диполь – сначала падает до нуля и возвращается к высоким значениям только после полного обращения полюсов. Сокращение времени релаксации в эпоху частых инверсий ведет к длительному понижению абсолютной величины земного магнитного поля. Возникающие в этот момент плюмы способны отвести избыток тепла и стабилизировать режим работы геодинамо вплоть до почти полного прекращения инверсий. С периодами ультрачастых инверсий мы связываем вендский и девонский геомагнитный феномен. В это время, в период длительно низкой величины аксиального диполя, конфигурация магнитного поля Земли определялась его незональными гармониками низких порядков, а также мировыми магнитными аномалиями. Качественное сходство наблюдаемых палеополусов с центрами нижнемантийных гравитационных и магнитных аномалий позволяет предположить их стационарное положение и создает предпосылки для обоснования новой системы отсчета для палеотектонических реконструкций в абсолютных координатах. Выполненные с ее использованием построения согласуются с гипотезой фиксированных горячих точек. Сибирский континент от терминального докембрия до мезозоя включительно находился в области влияния Африканского горячего поля мантии, смещаясь в северном направлении вдоль меридиана 0° от координат Тристан-да-Кунья до Исландии.

*Горячие точки, плюмы, геодинамо, частота геомагнитных инверсий, палеонапряженность, аксиальный магнитный диполь, экваториальный магнитный диполь, аномальное геомагнитное поле, мировые магнитные аномалии, абсолютные реконструкции.*

## EVOLUTION OF THE GEOMAGNETIC FIELD AND MANTLE PLUME MAGMATISM APPLIED TO SPACE-TIME RECONSTRUCTIONS IN ABSOLUTE COORDINATES

D.V. Metelkin<sup>1,2</sup>, E.V. Vinogradov<sup>1,2</sup>, A.A. Eliseev<sup>1,2</sup>, M.E. Luzan<sup>1,2</sup>, V.V. Abashev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, ul. Pirogova 1, Novosibirsk, 630090, Russia

<sup>2</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, pr. Akademika Koptuyga 3, Novosibirsk, 630090, Russia

<sup>3</sup>Geological Institute Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky per. 7, str. 1, Moscow, 119017, Russia

We present an analysis of modern paleomagnetic data from large igneous provinces and palaeorift structures in Siberia and the High Arctic that are potentially related to mantle plumes. The interrelationship between plume magmatism, geomagnetic reversal frequency, and field intensity over the last 600 Myr exhibits a

periodicity of 70–100 Myr. Periods of mantle plume activity were preceded by an increase in geomagnetic reversal frequency, accompanied by a decrease in geomagnetic field intensity. Our proposed hypothesis explains this effect by changes in the thermal convection in the Earth's outer core while mantle plumes are regarded as regulators of the state of the hydromagnetic dynamo. "Overheating" of the core increased the turbulence of convective currents, and therefore, the amount of reversals. During reversals, the value of the main component of the geomagnetic field – the geocentric axial dipole – first fell to zero and returned to high values only after a full reversal of the poles. Reduction of relaxation time in periods of frequent reversals led to prolonged low values of the absolute intensity of the geomagnetic field. Mantle plumes forming during such periods could remove the excess heat and stabilize the state of the geodynamo, even almost completely stopping reversals. We link the Vendian and Devonian geomagnetic phenomena to periods of ultra-frequent reversals. During these extended periods of low value of the axial dipole, the configuration of the geomagnetic field was determined by low-order non-zonal harmonics and by the global magnetic anomalies. We observe a qualitative coincidence of the position of paleopoles with centers of lower mantle gravitational and magnetic anomalies and postulate that the anomalies were stationary. This is the basis for substantiating a new reference framework for paleotectonic reconstructions in absolute coordinates. Examples of reconstructions made using this system also agree with the hypothesis of stationary hotspots. From the terminal Precambrian to the Mesozoic inclusively, the Siberian paleocontinent was located in the area of effect of the African mantle hot field, migrating northwards along the 0° meridian from the latitude of Tristan da Cunha to that of Iceland.

*Hotspots, mantle plumes, geodynamo, geomagnetic reversal frequency, paleointensity, geocentric axial dipole, equatorial dipole, anomalous geomagnetic field, global magnetic anomalies, absolute plate reconstructions.*

---

## ВВЕДЕНИЕ

Палеомагнитный метод давно и прочно зарекомендовал себя в качестве эффективного инструмента реконструкции тектонической истории Земли. При этом вопросы эволюции самого геомагнитного поля, изменения его напряженности, морфологии, частоты смены полярности, прочие вариации геомагнитных параметров широко обсуждаются в контексте моделирования глубинных геодинамических процессов. В частности, палеомагнитные данные, как прямая характеристика режима работы геодинамо в масштабе геологического времени, являются одним из немногих численных критериев для обоснования теории плюм-тектоники, которую активно развивал академик Н.Л. Добрецов [Добрецов и др., 2001; Добрецов, 2010, 2020]. Не остались без его внимания проблемы зарождения и генерации геомагнитного поля, периодичность событий в магнитосфере и их влияние на другие оболочки Земли, в том числе биосферу [Добрецов, 1994, 2010, 2015; Кирдяшкин и др., 2000; Добрецов, Чумаков, 2001]. Так последняя работа, подготовленная Н.Л. Добрецовым [Добрецов и др., 2021], была посвящена анализу современных знаний о магнитном поле Земли. В частности, в ней обсуждались общие характеристики и закономерности структуры геомагнитного и гравитационного полей, их связь с проявлениями плюмового магматизма. Выполненный анализ позволил сформулировать вывод о качественном сходстве в расположении современных магнитных, гравитационных аномалий глубинного происхождения и известных крупных магматических провинций. Также были представлены фактические обоснования корреляционной зависимости между вариациями частоты магнитных инверсий и интенсивностью плюмовых событий. Это стало новым подтверждением тезиса об определяющей роли плюмов не только в регулировании режима работы геодинамо, но и характере мантийной конвекции, влияющей на процессы в тектоносфере [Добрецов и др., 2021]. В настоящей работе предлагается развитие этих идей, включая обзор и анализ новых фактических данных о структуре геомагнитного поля в периоды его крупных перестроек, сопровождаемых активизацией плюмового магматизма на территории Сибири в конце венда (эдиакария) – раннем кембрии, начале девона, на рубеже перми – триаса, а также на прилегающих арктических окраинах в раннем мелу. Особое внимание будет уделено рассмотрению проблемы вендского и девонского геомагнитного феномена, связанного, как считается, с аномальным

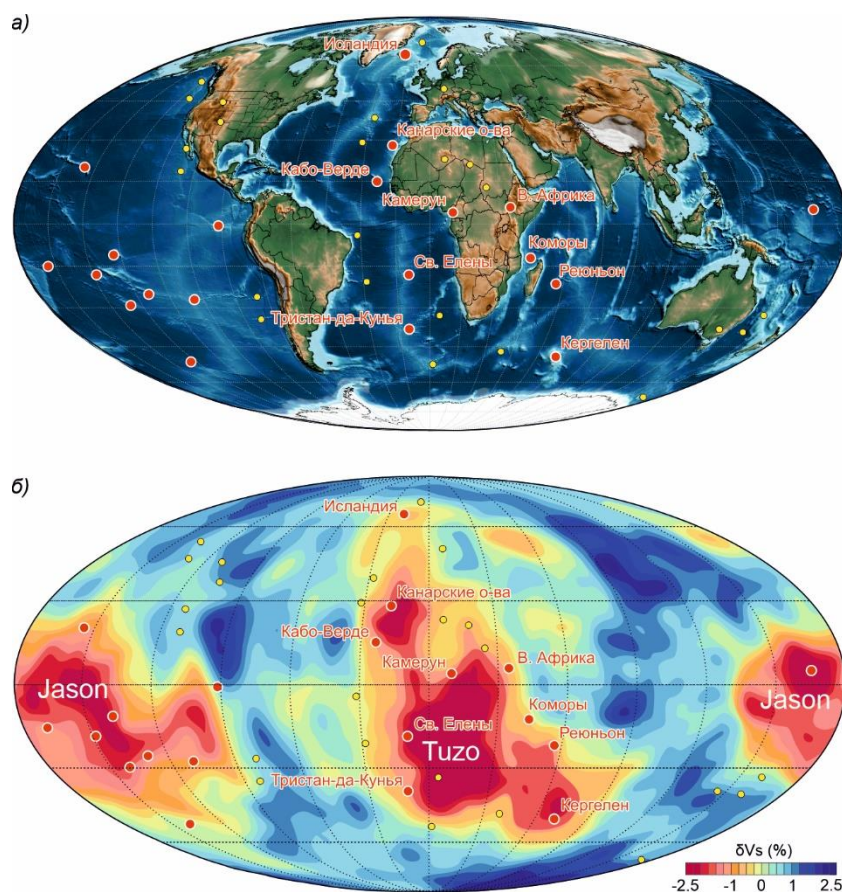
состоянием магнитного поля Земли, нарушением его преобладающей аксиальной дипольной конфигурации и соответственно возможности использования палеомагнитных данных для пространственно-временных реконструкций.

## **ГИПОТЕЗА СТАЦИОНАРНЫХ ГОРЯЧИХ ТОЧЕК И ПАЛЕОМАГНИТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕЗОЗОЙСКОГО ПЛЮМОВОГО СЛЕДА.**

Главным преимуществом палеомагнитных данных при палеотектоническом моделировании является возможность количественной оценки пространственно-временных взаимоотношений блоков земной коры и, соответственно, возможность восстановления скорости их дрейфа и прочих динамических параметров эволюции различных палеогеодинамических систем. Так накопленный сегодня объем палеомагнитных данных позволяет в общих чертах охарактеризовать палеогеографию большинства крупных и средних литосферных плит, прежде всего кратонов. А на основе сравнения временных рядов палеомагнитных полюсов - траекторий кажущегося движения полюса (ТКДП) - перейти к восстановлению их взаимного расположения, реконструкции сбора и распада суперконтинентов и многое другое. Примером таких обобщений для Сибирского кратона являются реконструкции, опубликованные в [Зоненшайн и др., 1990; Печерский, Диденко, 1995; Хераскова и др., 2010; Добрецов, 2011; Метелкин и др., 2005, 2007, 2012].

Однако несмотря на очевидные преимущества при интерпретации фактического набора палеомагнитных данных остается целый ряд неоднозначных решений. Одной из таких проблем является долготная неопределенность. Если географическая широта реконструируемого тектонического блока в прошлом на основе качественных палеомагнитных данных может быть восстановлена с точностью до первых градусов, то зафиксировать палеодолготу невозможно. Это обусловлено математической неоднозначностью при решении обратной задачи по расчету географического положения реконструируемого блока по координатам его палеомагнитного полюса и связано с наблюдаемой структурой магнитного поля Земли. Достоверно установлено, что при осреднении главных векторных характеристик за интервал времени  $>10^5$  лет (вековые вариации) конфигурация геомагнитного поля отвечает модели центрального осевого диполя (ЦОД), когда географические и магнитные полюсы/широты совпадают. А для определения палеодолготы, согласно модели ЦОД, необходима дополнительная фиксированная точка отсчета.

В качестве такого репера предлагается использовать координаты горячих точек, отражением эволюции которых является плюмовый магматизм и формирование крупных изверженных провинций (LIP) над ними [Morgan, Morgan, 2007; Steinberger, Torsvik, 2008; Seton et al., 2012]. Идея о длительной стационарности горячих точек основана на представлениях о механизме формирования плюмовых струй. Зарождение нижнемантийных, т.н. «первичных» плюмов, связывают с термохимическими процессами на уровне слоя D". В упрощенном виде на этой границе водород, выделяющийся из ядра, реагирует с нижнемантийным веществом с образованием воды и кремнистой фазы, резко понижающих температуру плавления окружающего массива пород нижней мантии. Возникающие таким образом горячие точки (поля) расплавленного мантийного вещества в поле силы Кариолиса создают устойчивые вихревые течения, обуславливающие подъем плюма к поверхности [Добрецов, 1994; Добрецов и др., 2001; Zhao, 2001; Jellinek, Manga, 2004; Hunt, van den Bremer, 2011]. В сейсмическом образе слоя D" такие горячие поля, очевидно, отражаются неоднородностями пониженных скоростей (рис. 1). Выделяется две антиподальные крупные провинции с низкой скоростью поперечных (S) волн (LLSVP – Large Low Shear Velocity Provinces), а их проекции на поверхность геоида образуют крупные поля Африканское (Tuzo) и Тихоокеанское (Jason), которые в рамках имеющихся моделей сохраняют квазистационарное положение длительное время [Courtillot et al., 2003; Burke, Torsvik, 2004; Torsvik et al, 2008, 2014; Wang et al., 2018].



**Рис. 1.** Положение горячих точек (красные точки – отвечающие первичным плюмам, генерируемым на границе ядро-мантия [Steinberger, 2000; Courtillot et al., 2003; French, Romanowicz, 2015]; желтые точки – вторичные или неизвестного происхождения) на глобальной карте рельефа и батиметрии (а) и на карте распределения скоростей S-волн на глубине 2800 км по [Becker, Boschi, 2002], где красный цвет соответствует областям с низкой скоростью S-волн и образует две LLSVP: Tuzo и Jason (б). Список горячих точек Tuzo, потенциально имеющих фиксированное положение и используемых для палеогеографических реконструкций в абсолютных координатах, представлен в таблице 1.

Однако концепция фиксированного положения горячих точек, относительно которых возможны глобальные палеотектонические построения в абсолютных координатах, с учетом не только широтного, но долготного положения литосферных плит, оспаривается. В том числе требует подтверждения стационарность отдельных плюмовых струй, максимальное время их «жизни» с периодическим отрывом и переносом порций нижнемантийного вещества от ядра в литосферу. Среди всего известного списка горячих точек, на роль опорных для фиксированной системы координат могут претендовать не более половины. Их зарождение на уровне D'' и связь с LLSVP обосновано [Steinberger et al., 2000; Courtillot et al., 2003; French, Romanowicz, 2015]. Нижнемантийное происхождение остальных не столь ясно, некоторые из них, вероятно относятся к вторичным плюмам, источники которых находятся гораздо ближе к поверхности и вероятно образуются вследствие накопления и перераспределения нижнемантийного вещества первичных плюмов, т.е. вряд ли могут сохранять стационарное положение длительное время.

В этой связи одним из интереснейших полигонов является Исландская горячая точка на северной периферии Африканской LLSVP. Допускается, что она генерирует первичные плюмы и имеет стационарное положение минимум 250 млн лет [Kuzmin et al., 2010; Кузьмин и др., 2011;

**Таблица 1.** Список горячих точек Африканской LLSVP по [Steinberger, 2000]

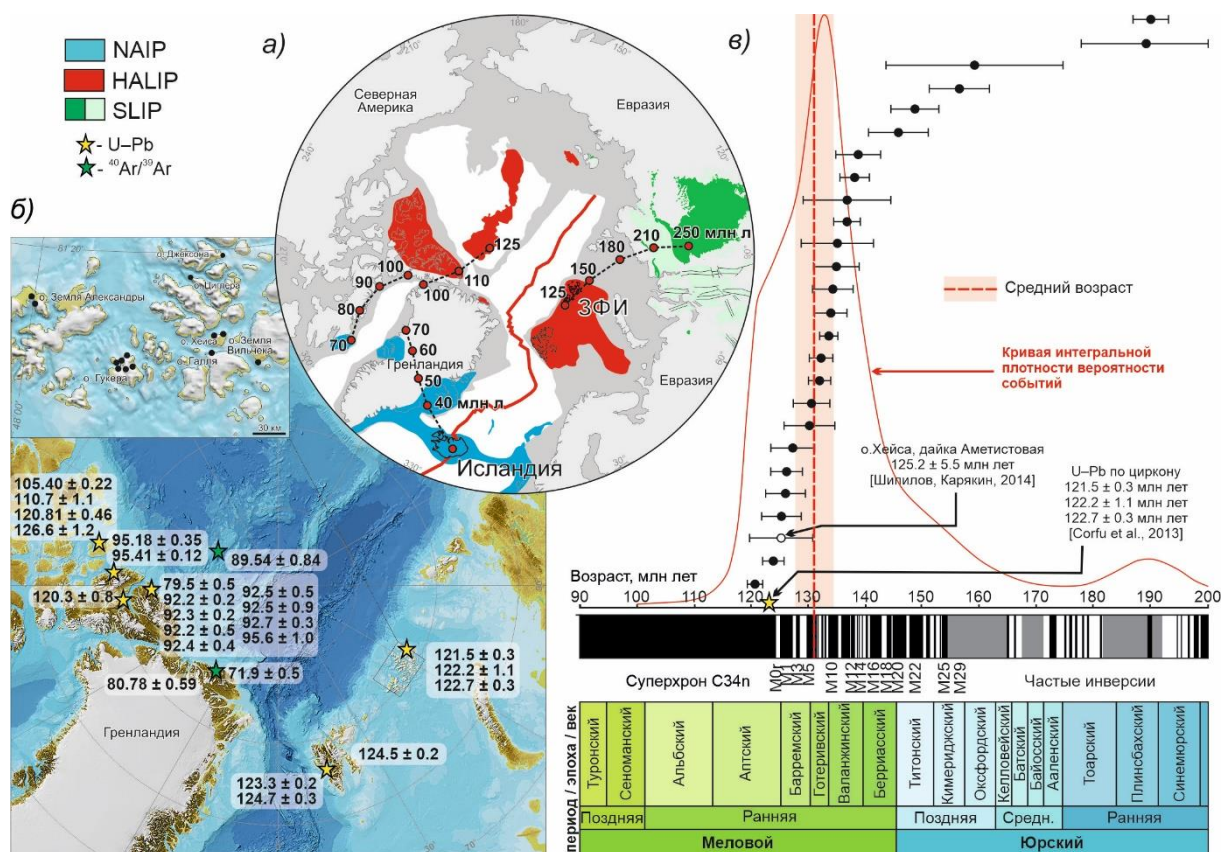
Название горячей точки	Возраст, млн лет	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.
Азорские острова	100	38.5	331.6
Вема	40	-33	4
<b>Восточная Африка</b>	<b>40</b>	<b>6</b>	<b>34</b>
Дарфур	140	13	24
<b>Исландия</b>	<b>60</b>	<b>65</b>	<b>341</b>
<b>Кабо-Верде</b>	<b>20</b>	<b>15.</b>	<b>336</b>
<b>Камерун</b>	<b>31</b>	<b>4.2</b>	<b>9.2</b>
<b>Канарские острова</b>	<b>65</b>	<b>28</b>	<b>342</b>
<b>Кергелен</b>	<b>117</b>	<b>-49</b>	<b>69</b>
<b>Коморские острова</b>	<b>63</b>	<b>-11.8</b>	<b>43.3</b>
Марион	195	-46.9	37.8
Метеор	120	-52	1
Новая Англия	120	28	328
<b>Реюнион</b>	<b>67</b>	<b>-21.2</b>	<b>55.7</b>
<b>Святой Елены</b>	<b>100</b>	<b>-17</b>	<b>350</b>
Тибести	80	21	17
Триндади	65	-20.5	331.2
<b>Тристан-да-Кунья</b>	<b>125</b>	<b>-38</b>	<b>349</b>
Фернандо	201	-4	328
Хоггар	20	23	6
Эйфель	40	50	7
Ян-Майен	210	71.1	351.8

Жирным выделены первичные плюмы

Добрецов и др., 2013; Метелкин и др., 2021]. Проекцией современного расположения горячей точки на земной поверхности является крупный вулканический остров Исландия в центре срединного хребта Рейкьянес (рис. 1). Наиболее молодая Североатлантическая магматическая провинция (NAIP), отвечающая эволюции этой горячей точки, включает мощные покровы базальтов центральной части Восточной Гренландии, поля пикритовых и базальтовых лав на ее западном побережье и юго-востоке острова Баффин, лавы Фарерских островов и Великобритании, а также значительные по размерам подводные вулканические плато Северной Атлантики [Jiang et al., 2023] (рис. 2). Опубликованные значения возраста базальтов NAIP варьируют от  $76.1 \pm 1.7$  млн лет [Chambers, Pringle, 2001] до  $13.6 \pm 0.4$  млн лет [Storey et al., 2004]. Тем не менее обоснованные определения свидетельствуют, что главная магматическая фаза длилась около 11 млн лет от  $64.2 \pm 0.2$  млн лет до  $54.54 \pm 0.39$  млн лет, а фрагментарное расположение соответствующих ареалов обусловлено процессами спрединга в Северной Атлантике [Jiang et al., 2023]

Яркий позднемезозойский след Исландского плюма, согласно построениям [Lawver, Müller, 1994; Lawver et al., 2002; Torsvik et al., 2008; Kuzmin et al., 2010; Gaina et al., 2014; Метелкин и др., 2021], проявлен на побережье острова Элсмир, Канадском арктическом архипелаге и структурах подводного хребта Альфа-Менделеева, где зафиксированы продукты характерного базальтоидного магматизма [Oakey, Saltus, 2016; Kristoffersen et al., 2023]. До раскрытия арктических котловин Нансена и Амундсена, они надстраивали современный Баренцевоморский континентальный шельф, на территории которого, включая острова архипелага Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) и Шпицберген, также сконцентрированы большие объемы аналогичных магматических пород [Верниковский и др., 2013; Добрецов и др., 2013; Corfu et al., 2013; Polteau et al., 2016; Шипилов, 2016; Метелкин и др., 2021, 2022a] (рис. 2). Весь этот значительный по площади (более 2 млн км<sup>2</sup>) ареал базальтоидного магматизма принято называть крупной магматической провинцией Высокоширотной Арктики (High Arctic Large Igneous Province - HALIP).





**Рис. 2.** Распространение продуктов плюмового магматизма NAIP, HALIP, SLIP (включая погруженные и интрузивные, обозначенные светло-зеленым) и трек Исландской горячей точки по [Lawver, Müller, 1994; Kuzmin et al., 2010] с исправлениями (а); расположение точек с достоверными геохронологическими оценками возраста по [Jiang et al., 2023] и, на врезке, положение точек палеомагнитного опробования из естественных обнажений ЗФИ [Абашев и др., 2018; Метелкин и др., 2022а] (б); результаты статистического анализа имеющихся для ЗФИ  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  определений по [Абашев и др., 2020] и сопоставление полярности датированных палеомагнитных определений с магнитохронологической шкалой юры-мела по [Walker et al., 2013], в шкале черный цвет соответствует прямой, белый – обратной, серый – смешанной (частые инверсии вне масштаба) полярности (в).

Согласно ранним представлениям о возрасте базальтоидного магматизма HALIP, его наиболее значительная по объему Баренцевоморская часть формировалась с юры, постепенно сдвигаясь к территории Канадского арктического архипелага и далее к более молодым проявлениям NAIP. Так центр Исландского плюма в реконструкциях [Lawver et al., 2002; Kuzmin et al., 2010] для рубежа 150 млн лет располагается вблизи ЗФИ, а затем в интервале 130 – 100 млн лет на территории Арктической Канады. В пользу этого свидетельствуют единичные  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  определения возраста базальтовых лав на о. Гукера и о. Земля Александры [Карякин, Шипилов, 2009; Шипилов, Карякин, 2011]. Однако более поздние авторские  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  исследования не подтвердили наличие юрского импульса на ЗФИ [Абашев и др., 2020; Метелкин и др., 2022а]. Выполненные недавно обобщения и анализ всего современного набора геохронологических данных по территории ЗФИ [Jiang et al., 2023] указывают на исключительно раннемеловой возраст HALIP. Предполагается два кратких импульса в интервалах 125-120 и 96-92 млн лет. При этом наиболее древние оценки возраста тяготеют к Баренцевоморскому, а молодые – к Канадскому ареалам HALIP (рис. 2). Подтверждение этого возраста HALIP также имеются в данных магнитостратиграфии и по корреляции с глобальным раннемеловым аноксическим событием [Polteau et al., 2016; Zhang et al., 2021, Li et al., 2023; Dummann et al., 2024].

Авторский набор палеомагнитных данных по территории ЗФИ (более 700 образцов с 8 островов юго-западной и центральной части архипелага, в том числе: о. Земля Александры, о. Гукера, о. Хейса, о. Ферсмана, о. Галля, о. Циглер, о. Джексона и о. Земля Вильчика) также вполне однозначно

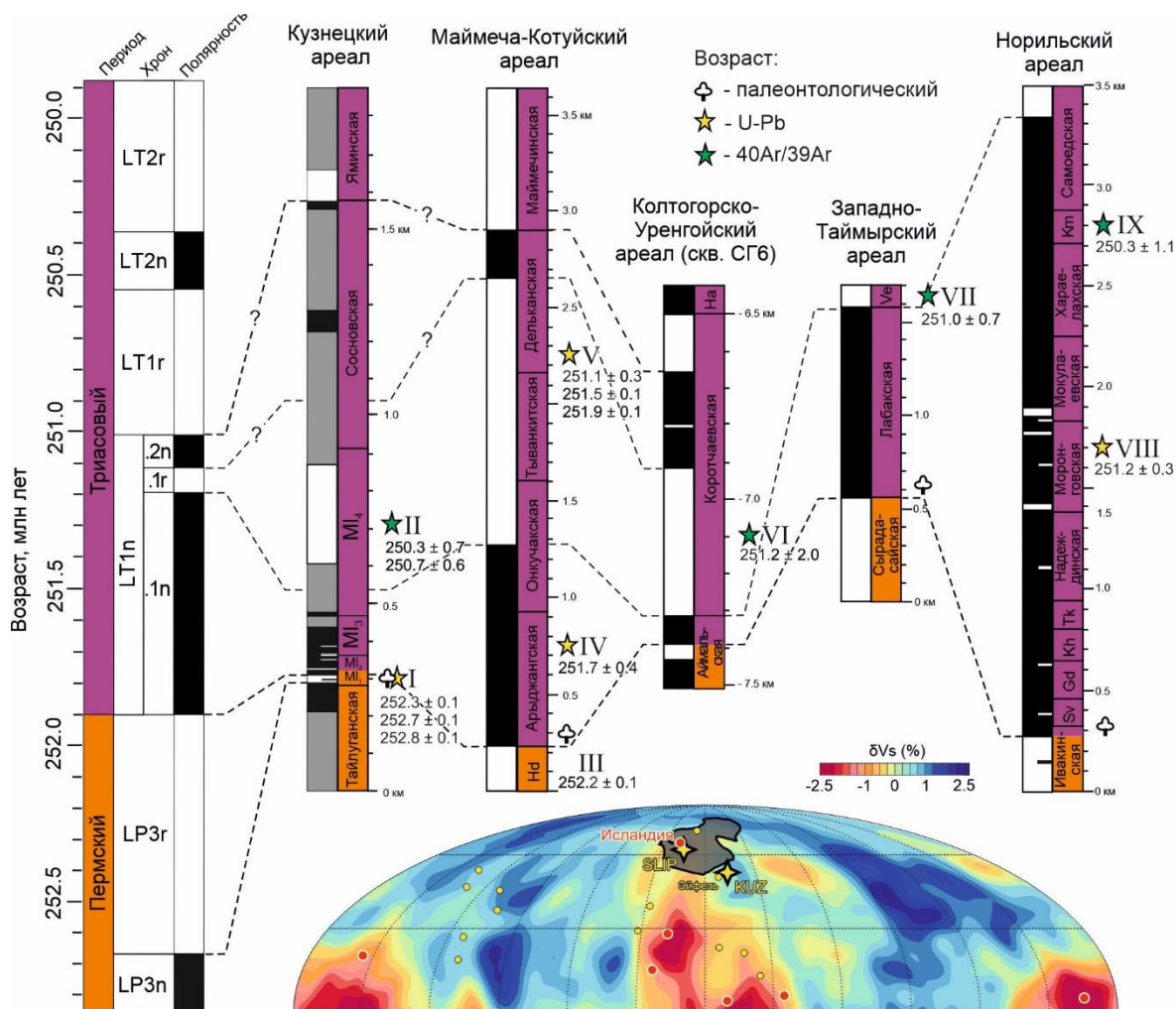
указывает на раннемеловой возраст магматизма. Практически все палеомагнитные векторы имеют положительное наклонение [Абашев и др., 2018; Метелкин и др., 2022a]. Исключение составляет только характеристическая намагниченность, обнаруженная в дайке Аметистовая на о. Хейса [Михальцов и др., 2016],  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  возраст которой определен как  $125.2 \pm 5.5$  млн лет [Шипилов, Карякин, 2014]. Преобладающий монополярный характер палеомагнитной записи противоречит возможности юрского намагничивания пород, поскольку для этого интервала эволюции геомагнитного поля и до середины баррема характерен режим частых ( $> 3$  раз в млн лет) инверсий (рис. 2). Напротив, преобладающая монополярная палеомагнитная запись, хорошо сочетается с мировыми данными о меловом суперхроне нормальной полярности. Согласно имеющимся оценкам возраст намагниченности будет отвечать началу хрона C34n или хрону M1 преобладающей прямой полярности, а отрицательно намагниченная Аметистовая дайка фиксирует узкую магнитозону M0r на рубеже баррема – апта,  $121.2 \pm 0.4$  Ма по [Zhang et al., 2021]. Статистический анализ имеющейся по территории ЗФИ совокупности  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  определений предполагает несколько более древний возраст магматизма  $\sim 130$  млн лет (рис. 2). В рамках этой оценки нормальная полярность большей части изученных пород будет древнее C34n и может быть скоррелирована с магнитохронами валанжина – баррема, но не древнее магнитозоны M10n (рис. 2).

Одноактный магматизм на территории ЗФИ поддерживается отсутствием дискретности в расположении рассчитанных виртуальных геомагнитных полюсов, а наблюдаемая дисперсия объясняется вековыми вариациями геомагнитного поля [Абашев и др., 2018; Метелкин и др., 2022a]. Полученное среднее значение палеошироты для ЗФИ  $62.7^\circ \pm 3.7^\circ$  с.ш. совпадает с широтой Исландии (см табл. 1) и, учитывая современные сведения о возрасте HALIP, позволяет скорректировать ранее предложенные варианты «трека» Исландской горячей точки не только для мелового интервала, но и на весь ранний мезозой вплоть до рубежа перми – триаса.

С пермо-триасовым проявлением активности Исландского плюма, согласно построениям [Kuzmin et al., 2010; Добрецов и др., 2013; Метелкин и др., 2021], связана Сибирская крупная изверженная провинция (SLIP) (рис. 2). Основной обнаженный ареал SLIP на Сибирской платформе включает мощную последовательность базальтовых лав с подчиненным объемом пирокластических пород и силлов в Норильском и Маймеч-Котуйском районах. К югу Тунгусской синеклизы мощность вулканической толщи постепенно уменьшается. Северным продолжением сибирских траппов являются менее мощные поля базальтов и многочисленные базитовые интрузии Южного Таймыра [Vernikovskiy et al., 2003; Augland et al., 2019]. Кроме того, значительные объемы траппов выявлены сейсмическими данными и подтверждены бурением под мезозойско-кайнозойским осадочным комплексом Западно-Сибирской плиты, включая Енисей-Хатангский прогиб, а также смежный шельфовый бассейн Южно-Карской котловины [Добрецов, 1997, 2005; Westphal et al., 1998; Dobretsov, Vernikovskiy, 2001; Reichow et al., 2002; Vernikovskiy et al., 2018]. Наиболее южным сателлитом сибирских траппов является магматический ареал Кузнецкого прогиба, расположенный на территории Алтае-Саянской складчатой области, на юго-западной периферии SLIP [Казанский и др., 2005; Буслов и др., 2010; Елисеев и др., 2024].

Сегодня опубликовано более 150 определений возраста SLIP, включая результаты  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  и U-Pb датирования. Диапазон полученных дат составляет от  $290 \pm 2.8$  млн лет [Малич и др., 2012] до  $219.2 \pm 13.5$  млн лет [Dalrymple et al., 1995]. Однако, тщательный анализ всего этого набора геохронологических данных позволяет утверждать, что формирование основного объема SLIP приходится на очень короткий ( $\sim 1$  млн лет) промежуток времени непосредственно на рубеже перми-триаса  $\sim 252\text{--}251$  млн лет [Jiang et al., 2023].

Такие оценки продолжительности плюмовой активности находятся в хорошем согласии с магнитостратиграфическими корреляциями. В частности, в работе [Елисеев и др., 2024], касающейся



**Рис. 3.** Сопоставление магнитостратиграфических разрезов SLIP с глобальной шкалой магнитной полярности [Gradstein et al, 2020] и реконструированное положение Сибири (широта определена по палеомагнитным данным [Елисеев и др., 2024], долгота – согласно гипотезе фиксированных горячих точек). Магнитостратиграфический разрез Кузнецкого ареала по [Елисеев и др., 2024; Davydov et al., 2021], Маймеча-Котуйского ареала по [Latyshev et al., 2020], Колтогорско-Уренгойского ареала по скв. СГ-6 [Казанский и др., 2000], Западно-Таймырского ареала по [Gurevitch et al., 1995], Норильского ареала по [Lind et al., 1994; Михайлов и др., 2012]. Цифры у значков возраста соответствуют млн. лет, согласно определениям: I - [Davydov et al., 2021], II – [Reichow et al., 2009], III – [Burgess, Bowring, 2015], IV – по перовскиту [Kamo et al., 2003], V – [Kamo et al., 2003; Burgess, Bowring, 2015], VI – [Сараев и др., 2009], VII – [Reichow et al., 2009], VIII – [Kamo et al., 2003], IX – [Reichow et al., 2009]. Буквами в колонках обозначены свиты: Hd – хардахская, Ha – хадырьяхская, Ve – верхнетамская, Sv – сыверминская, Gd – гудчихинская, Kh – хаканчанская, Tk – туклонская, Km – кумгинская и подсвиты мальцевской свиты: M11– таракинихинская, M12– барсучинская, M13– кедровская, M14– рябокаменская. Желтой звездой показаны предполагаемые центры SLIP и ее Кузнецкого магматического ареала (KUZ).

эволюции Кузнецкого ареала SLIP показано, что образование абинской серии, включающей проявления траппового вулканизма, длилось не более 1.5 млн лет синхронно с формированием наиболее мощных вулканических разрезов Маймеча-Котуйского района, а длительность главного импульса магматизма с формированием базальтовых покровов на периферии SLIP составляло всего 0.1 млн лет. Откорректированная с учетом палеомагнитных и геохронологических данных [Davydov et al., 2021] схема корреляции представлена на рисунке (рис. 3). Палеомагнитный полюс для SLIP, рассчитанный по всему объему данных по Кузнецкому ареалу:  $59.0^\circ$  с.ш.,  $160.3^\circ$  в.д.,  $A95 = 5.7^\circ$ , мало отличается от среднего по наиболее изученному Маймеча-Котуйскому району [Pavlov et al., 2019]. В



реконструированном по этим координатам положении Сибири, широтам Исландии с учетом ошибки палеомагнитных определений соответствует центральная часть обнаженной территории SLIP (рис. 3). Учитывая сведения о мощности и полноте траптовых разрезов, мы полагаем что центральное место, непосредственно над Исландской горячей точкой, 250 млн лет назад занимала территория Маймеча-Котуйского ареала (рис. 2, 3). Именно здесь широко проявлены ультрамафит-мафитовые интрузии и пикриты (меймечиты), которые являются прямым доказательством высокой степени плавления на пике активности Сибирского плюма [Соболев и др., 2009; Sobolev et al., 2011]. Примечательно, что территория Кузнецкого ареала располагается на реконструкции непосредственно на координатах горячей точки Эйфель.

Учитывая гигантские объемы мантийных вулканических и интрузивных пород SLIP (по разным оценкам от 4 до 16 млн км<sup>3</sup> [Добрецов, 2005; Reichow и др., 2009; Ivanov et al., 2013]) и площадь их распространения (5 – 7 млн км<sup>2</sup>), мощность генерирующего их плюма была колоссальной. Соответственно поднятие плюма к поверхности обеспечило отвод значительного количества тепла от ядра регулируя, таким образом, режим работы геодинамо. Таким образом, очевидно, что периоды активизации плюмового магматизма не могут не отражаться в вариациях характеристиках геомагнитного поля. Наиболее отчетливо это видно по изменению частоты инверсий и его абсолютной величины (напряженности), что будет проиллюстрировано в следующем разделе.

#### **СВЯЗЬ ПЛУМОВОГО МАГМАТИЗМА С ВАРИАЦИЯМИ ЧАСТОТЫ МАГНИТНЫХ ИНВЕРСИЙ И ПАЛЕОНАПРЯЖЕННОСТЬЮ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Вариации, связанные с изменением полярности (инверсиями), являются важнейшим свойством геомагнитного поля. С этим явлением связано обоснование нескольких основополагающих гипотез тектоники литосферных плит и также объяснение ряда принципиальных закономерностей эволюции геодинамо. Несмотря на то, что временная магнитополярная запись имеет стохастический характер, намечаются определенная периодичность в изменениях частоты и скорости инверсий.

Согласно имеющимся данным, время за которое происходит полное обращение полюсов аксиального диполя – главной составляющей земного магнетизма, очень короткое в геологических масштабах [Merril, McFadden, 1999; Valet et al., 2012]. Результаты численного моделирования [Glatzmaier, Roberts, 1995; Sarson, Jones, 1999; Kutzner, Christensen, 2002; Roberts, 2015] предполагают наличие нестабильного – диффузного состояния аксиального диполя непосредственно перед и после инверсии длительностью ~ 20 тыс лет, а время самой инверсии, когда дипольный момент близок нулю и аксиальная конфигурация магнитного поля полностью нарушена, составляет не более 0.1 – 0.5 от времени диффузной устойчивости (1 – 10 тыс лет). Эпохи между инверсиями в 10 – 20 раз дольше (200 – 400 тыс лет). Соответственно, максимальная частота инверсий, согласно модели, до 5 – 6 за млн лет.

Наиболее достоверные фактические сведения о длительности инверсионных переходов, напряженности магнитного поля и многих других характеристиках его структуры во время инверсий получены по результатам изучения LIP [Ferk, Leonhardt, 2009; Jarboe et al., 2011; Channell et al., 2017; Елисеев и др., 2022; Абашев и др., 2024, Метелкин и др., 2019, 2024; Щербакова и др., 2013, 2015]. Это обусловлено максимальной полнотой записи последовательности «мгновенных слепков» древнего геомагнитного поля, которую обеспечивает термоостаточная намагниченность базальтовых покровов. При этом сами LIP являются отражением крупных перестроек на уровне ядро – мантия и, соответственно, наличие взаимной связи магнитных инверсий и плюмового магматизма ожидаемо [Larson, Olson, 1991; Olson et al., 2011; Добрецов, 2010, Диденко, 2011].

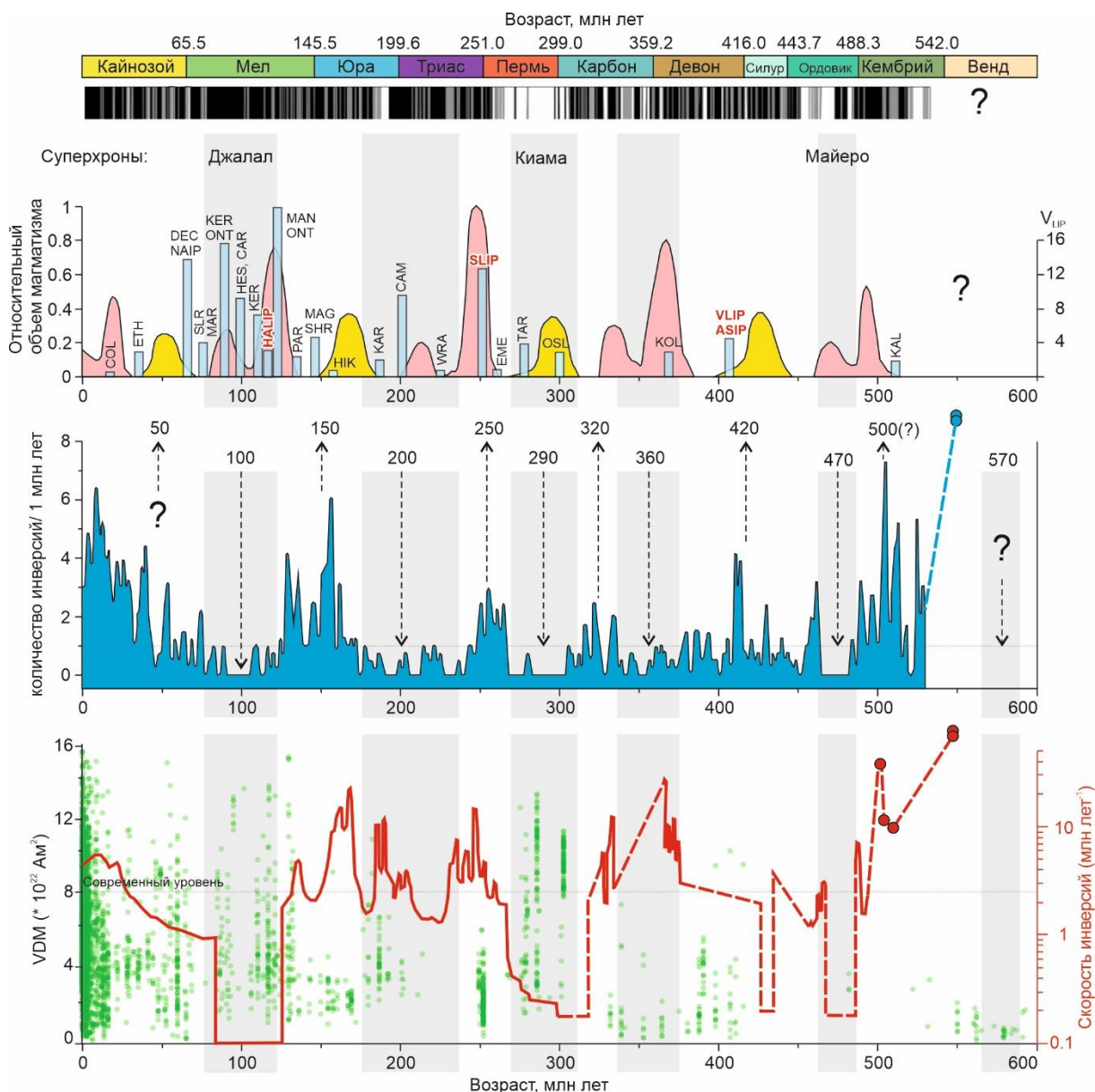
Основы модели, объясняющей такую зависимость, предложены в работах Н.Л. Добрецова [Добрецов и др., 2001, 2021, Добрецов, 2005, 2010] и также поддерживаются в [Hounslow et al., 2018; Biggin et al., 2020]. Предполагается, что кондуктивный перенос в мантии не в полной мере справляется с отводом тепла, что приводит к постепенному накоплению его излишков и разогреву

внешнего ядра. Геодинамическая машина разгоняется, конвекция во внешнем ядре становится все более турбулентной, количество и частота инверсий увеличиваются. С накоплением внутреннего тепла также растет температурный градиент и ускоряется мантийная конвекция. Это отражается в скоростных характеристиках движения плит, более интенсивной субдукции, аккреции и коллизии, итогом которых является складирование холодного вещества слэбов на уровне слоя D", что, в свою очередь, способствует активизации процессов генерации плюмов в пределах LLSVP. Возникающие в итоге частые, крупные мантийные струи, являются эффективным транспортом для отвода накопившихся излишек тепла и приводят к замедлению конвекции во внешнем ядре, ее обратному переходу из турбулентного состояния в стационарное, благодаря чему инверсии магнитного поля прекращаются. Вследствие остывания ядра также замедляется мантийная конвекция и в глобальном тектоническом режиме место преобладающих конвергентных процессов занимают внутриплитные, рифтогенные и затем дивергентные, отвечающие за дезинтеграцию палеоконтинентов и рост новообразованных океанических бассейнов.

Для иллюстрации положений такой модели на рисунок вынесена современная сводка данных об объемах плюмового и коллизионного магматизма, характере магнитополярной записи, вариациях частоты/скорости инверсий, а также имеющиеся фактические оценки абсолютной величины (напряженности) геомагнитного поля для последних 600 млн лет (рис. 4). Качество и детальность представленных временных рядов данных, несомненно, падает для более древних интервалов геологической истории. Тем не менее, для всего анализируемого отрезка геологического времени видна принципиальная зависимость: частота и скорость инверсий возрастает квазипериодически и достигает наибольших значений перед максимумами плюмового магматизма. Оценке повторяемости этих событий и выявлению ее геофизических, петрологических и прочих индикаторов, включая реакцию биосферы, уделяется большое внимание [Диденко, 1998, 2011; Кирдяшкин и др., 2000; Добрецов и др., 2001, 2021; Добрецов, 2005, 2010, 2015; Литасов, Шацкий 2016; Hounslow et al., 2018]. Конечно, строго совпадения анализируемых пиков и характерных экстремумов, равно как интервалов повторяемости событий наблюдать не приходится. Отклонения обусловлены разницей в реакциях различных геологических сред на изменение главных параметров геодинамо, индивидуальностью геологической обстановки конкретной геологической эпохи и многим другим. К примеру, наличию временного «шифта» между качественными изменениями в режиме работы геодинамо (падением частоты инверсий) и формированием LIP очевидно. Реакции внешнего ядра следует ожидать сразу после зарождения (отрыва) плюма, а для формирования LIP необходимо дополнительное время на подъем плюма к поверхности, формирование соответствующей вторичной магматической камеры на границе литосферы и собственно извержения. Согласно модельным оценкам этот временной шифт может составлять первые десятки млн лет [Courtillot, Olson, 2007; Диденко, 2011]. Не смотря на все сложности, в анализируемом ряду данных на качественном уровне вполне четко проявлен период повторяемости геомагнитных экстремумов в 70 – 100 млн лет (см рис. 4). Эту качественную оценку поддерживают результаты спектрального и статистического анализов, представленные в [Диденко, 1998, 2011], которые также фиксируют преобладающие стомиллионлетние вариации, что, в первом приближении, соответствует половине продолжительности циклов Бертрана.

Так HALIP является значительным вкладом в пик объемов плюмового магматизма отвечающего меловому суперхрону (интервалу с минимальной частотой инверсий) прямой полярности Джалал на уровне 80 – 120 млн лет. Предшествует ему заметный рост частоты инверсий с характерным пиком (не менее 6 инверсий в млн лет) на уровне средней - поздней юры (около 150 – 170 млн лет), кривая скорости инверсий также достигает максимума в это время (см рис. 4).

Пик объемов плюмового магматизма SLIP (250 млн лет) близок позднепермский максимум скорости и относительный максимум частоты инверсий, после которого на соответствующих графиках видны локальные минимумы. Количество инверсий в интревале позднего триаса – начала юры (180 – 240 млн лет) в среднем не более 1 за млн лет (см рис. 4).



**Рис. 4.** Сравнение поведение геомагнитного поля и плюмового магматизма за последние 600 млн лет. Сверху – вниз: шкала геомагнитной полярности, по [Печерский и др., 2010], черным отмечены периоды нормальной, белым – обратной, серым – неопределенной (частой – вне масштаба) полярности; график относительных объемов плюмового и коллизионного магматизма (VLIP – количество крупных изверженных провинций), по [Добрецов, 2010; Добрецов и др., 2021] с исправлениями, розовым цветом показаны объемы плюмового магматизма, желтым – субдукционного и коллизионного магматизма; голубыми полосами выделены объемы наиболее крупных изверженных провинций по [Ernst, 2014; Jiang et al., 2023] с дополнениями: COL – Колумбия, ETH – Эфиопия, DEC – Декан, NAIP – Северо-Атлантическая, SLR – Сьерра-Леоне, MAR – Королевы Мод, KER – Кергулен, HALIP – Высокоширотной Арктики, ONT – Онтонг-Ява, HES – Хесса, CAR – Карибская, MAN – Манихики, PAR – Парана-Этендека, MAG – Магеллана, SHR – Шатского, HIK – Хикуранги, KAR – Кару, CAM – Центрально-Атлантическая, WRA – Врангеля, SLIP – Сибирская, EME – Эмейшаньская, TAR – Таримская, OSL – Осло, KOL – Кола-Днепр, VLIP – Виллойская, ASIP – Алтае-Саянская, KAL – Калкаринджи (красным шрифтом выделены анализируемые в этой работе); частота инверсий по [Диденко, 2011], синими точками условно показаны единичные данные об ультрачастых (более 8 за млн лет) инверсиях [Popov et al., 2002; Шацилло и др., 2015; Bazhenov et al., 2016; Левашова и др., 2021]; оценки величины VDM (зеленые точки), согласно базе палеонапряженности [Bono et al., 2022] и кривая скорости инверсий (красная сплошная/пунктирная линия по наблюдаемым/модельным данным), по [Hounslow et al., 2018], красными точками условно показаны единичные данные, свидетельствующие о гиперактивности поля, возможно, превышающие представленные модельные значения скорости, по [Domeier et al., 2023].

Далее из-за более слабого обоснования фактическими данными, анализируемая кривая скорости инверсий и другие графики имеют преимущественно модельный вид. Тем не менее пермскому суперхрону обратной полярности Киама на уровне 270 – 310 млн лет также находится предшествующий эпизод относительного роста частоты и скорости инверсий в интервале от 310 до 340 млн лет (см рис. 4). Характер предполагаемого магматизма во время Киама хуже соответствует нашей модели. Тем не менее, на фоне теоретически преобладающих объемов коллизионного магматизма известны значимые по своей величине плюмовые проявления соответствующего возраста, прежде всего Таримская LIP [Борисенко и др., 2006; Добрецов и др., 2010; Ernst, 2014; Jiang et al., 2023]. Вероятно этот интервал геологической истории имел индивидуальные черты, либо выводы о соотношении объемов плюмового и коллизионного магматизма нуждаются в корректировке.

Следующий теоретический максимум объемов плюмового магматизма приходится на 340 – 370 млн лет. Количество инверсий в это время соответствует относительному минимуму – не более 1 за млн лет по [Диденко, 2011]. Максимум, предшествующий этому интервалу редких инверсий, отвечает раннему девону с пиком на уровне 410 – 420 млн лет (см рис. 4). Однако, надо отметить, что обоснованность всего девонского периода геологической истории фактическими палеомагнитными данными крайне низкая [Van der Boon et al., 2022] и реальное количество инверсий может значительно отличаться от рассчитанных в [Диденко, 2011]. На территории Сибири этому промежутку времени соответствует формирование Вилуйской трапповой провинции (VLIP), также значительные объемы раннедевонского плюмового магматизма отмечаются на территории центральной части Алтае-Саянской области (ASIP) [Ярмолюк и др., 2000; Kuzmin et al., 2010, Воронцов и др., 2023].

Наконец, найти обоснованные данные о фактических объемах LIP, соответствующих ордовикскому суперхрону Майеро (460 – 490 млн лет) крайне сложно, хотя плюмовые проявления этого возраста известны на многих континентах [Изох и др., 2010, 2011; Шелепаев и др., 2018; Jiang et al., 2023]. Предшествующий кембрийский интервал, согласно анализируемого графика частоты инверсий, характеризуется наиболее высокими (5 – 6 и более раз за млн лет) значениями (см. рис. 4). Обоснования аналитического максимума и дальнейшего сохранения длины периода повторяемости анализируемых геомагнитных событий затруднено. Характеристика магнитополярной записи для неопротерозойского интервала до сих пор крайне скудная. Однако, в последние годы получено несколько подтверждений экстремально высокой частоты инверсий в позднем эдиакарии (венде). Количество обращений геомагнитного полюса, согласно выполненным измерениям, в 5 раз превышает модельные оценки (25 – 30 раз за 1 млн лет) [Porov et al., 2002; Шацилло и др., 2015; Bazhenov et al., 2016; Левашова и др., 2021].

Независимым подтверждением факта ультрачастых инверсий в венде являются оценки палеонапряженности. Теоретические модели геодинамо постулируют рост напряженности в моменты его интенсивной работы, т.е. в эпохи «перегрева» ядра. Однако, также показано, что накопления излишков тепла ведет к переходу конвекции во внешнем ядре в турбулентное состояние. Это провоцирует значительное сокращение времени диффузной устойчивости и интервалов между инверсиями, соответственно, частота инверсионных переходов растет. В момент обращения полюсов дипольный момент падает до нуля [Таухе, Yamazaki, 2007; Храмов, Иосифиди, 2012]. А если частота таких падений высокая, то среднее для всей эпохи активного геомагнитного поля значение напряженности, не может быть высокой, напротив, будет стремиться к минимуму. Из-за ультрачастых инверсий, поле аксиального диполя просто не успевает восстановить свои значения и общая длительность нормального по величине поля, оказывается сопоставимо или даже меньше значений, отвечающих инверсионному переходу.

Хотя современная мировая база данных по палеонапряженности [Bono et al., 2022], особенно для палеозоя – неопротерозоя, невелика, приведенные на рисунке сопоставления подтверждают наш вывод (см. рис. 4). Выявленным интервалам с высокой частотой инверсий соответствуют преобладающие низкие значения виртуального дипольного момента (VDM). В том числе,

исключительно низкие наблюдаемые значения VDM характеризуют весь венд - раннекембрийский интервал [Bono et al., 2019; Shcherbakova et al., 2020; Метелкин и др., 2022б]. Мы полагаем, что ультрачастые инверсии могли обеспечить аномально низкую величину геомагнитного поля на протяжении значительного (~ 50 млн лет) времени [Виноградов и др., 2023, 2025]. В результате его обычная ЦОД морфология была нарушена, что является главной причиной фиксируемой во многих работах «загадочной» палеомагнитной записи для венда [Meert, 1999; Abrajevitch, Van der Voo, 2010; Biggin et al., 2012; Павлов и др., 2018; Шацилло и др., 2020; Domeier et al., 2023].

Длительность позднепалеозойско-мезозойских эпизодов увеличения частоты инверсий и взаимосвязанного падения интенсивности геомагнитного поля заметно меньше (см рис 4). Хотя в ранних работах активно обсуждалась идея «мезозойского низкого диполя» (МНД), согласно которой значение VDM более 100 млн лет была как минимум в 3 раза меньше современного [Prevot et al., 1990]. Возникновение этой идеи отвечает появлению первых оценок палеонапряженности для юрско-раннемелового (180–120 млн лет) времени, которые оказались заметно ниже современных. Затем, также низкие значения VDM были получены по разрезам Норильского ареала SLIP. Это позволило предположить, что начало периода МНД соответствует границе перми-триаса – 250 млн лет назад [Heunemann et al., 2004]. С накоплением фактических данных о палеонапряженности в мезозое [Щербакова и др., 2005, 2013, Blanco et al., 2012; Kulakov et al., 2019; Di Chiara et al., 2021; Bobrovnikova et al., 2022; Елисеев и др., 2022] идея МНД неоднократно подвергалась критике. В частности анализ вариаций VDM по траппам SLIP и HALIP свидетельствуют, что фиксируемые низкие значения отвечают эпизодам инверсий, а общая напряженность на рубеже перми - триаса и в раннем мелу в среднем лишь немного ниже современной. Соответственно, зафиксированное в МНД падение палеонапряженности не является отражением долгосрочной перестройки в работе геодинамо, а носит кратковременный характер и, как показывает анализ, связано с плюмовой активностью [Абашев и др., 2024, Метелкин и др., 2024].

Данные по кайнозою не так хорошо вписываются в представленную картину, хотя детальность всех сравниваемых графиков наибольшая. Теоретический максимум частоты, инверсий, отвечающий выявленной периодичности, следовало бы ожидать на уровне ~ 50 млн лет. Тем не менее, на графике в соответствующем интервале, напротив, имеются узкие локальные минимумы разделенные четкими пиками в 3 – 4 инверсии за млн лет. Главный кайнозойский максимум инверсий фиксируется на уровне ~ 10 млн лет, что хорошо коррелируется с пиком объемов плюмового магматизма, однако имеющиеся оценки палеонапряженности как низкие, так и крайне высокие, приблизительно в равной пропорции. В целом количество определений VDM для последних 10 млн лет соизмеримо с объемом данных для всей остальной анализируемой базы. Соответственно разрешающая способность для этого интервала и кайнозоя, в целом, существенно более высокая и требует отдельного подхода к анализу.

Противоположным по объему фактических данных исключением является интервал раннего палеозоя по девон, включительно. Так в базе данных по палеонапряженности для интервала 410 – 490 млн лет нет ни одного определения. Не отличается высоким разрешением и магнитополярная запись. Но, пожалуй, наиболее проблематичным, с точки зрения анализа данных, является девонский интервал [van der Boon et al., 2022, Метелкин и др., 2025]. В частности, наиболее достоверные оценки палеонапряженности свидетельствуют об исключительно низком VDM [Shcherbakova et al., 2017; Hawkins et al., 2021]. При этом длительность девонского интервала стабильно низкого поля сопоставим с вендским и, хотя приведенные данные о частоте инверсий не превышают модельные значения (см рис. 4), вероятное нарушение ЦОД конфигурации, особенно для раннего-среднего девона, подчеркивается многими исследователями [Шацилло, Павлов, 2019; Biggin et al., 2020; van der Boon et al., 2022; Метелкин и др., 2025]. Учитывая накопленный опыт изучения девонских пород есть основания считать, что режим работы геодинамо в это время был сопоставим с вендским. В частности мы предполагаем, что принятые оценки частоты инверсий, из-за неполноты анализируемой



базы данных, существенно ниже, чем на самом деле. В девоне, также как и венде ультрачастая смена полярности являлась главной причиной аномального (не соответствующего ЦОД) характера палеомагнитной записи. В таком случае, анализ палеомагнитных направлений для этих временных интервалов должен опираться на совершенно другие принципы и этому вопросу посвящен следующий раздел.

## **ДЕВОНСКИЙ И ВЕНДСКИЙ ГЕОМАГНИТНЫЙ ФЕНОМЕН И ПРЕДПОСЛЫКИ НОВОЙ АБСОЛЮТНОЙ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА ДЛЯ ПАЛЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ПОСТРОЕНИЙ**

Девонский и вендский интервалы геологического времени давно и справедливо считаются трудными с точки зрения интерпретации палеомагнитных данных. Суть проблемы заключается в том, что палеомагнитные направления зафиксированные в породах этого возраста указывают на наличие сразу нескольких полюсов (центров намагничивания) или вовсе имеют псевдохаотическое распределение, что не вписывается в стандартную модель ЦОД. Для объяснения этого геомагнитного феномена предлагаются самые разные гипотезы, от простого перемагничивания до крайне быстрого истинного смещения геомагнитного полюса или резкого увеличения скорости дрейфа литосферных плит [van der Boon et al., 2022; Domeier et al., 2023].

Согласно нашим представлениям, основанным на детальном анализе палеомагнитных данных для территории Сибири, не соответствующее ЦОД распределение палеомагнитных векторов, в действительности отражает эффект сложения быстро меняющейся по интенсивности компоненты аксиального диполя и слабых источников главного геомагнитного поля. К числу последних, в рамках общей теории геомагнетизма, могут быть отнесены незональные члены сферического гармонического анализа низких порядков (экваториальный диполь и/или секториальные квадрупольная/октупольная гармоники). В частности, в работах А.Н. Храмова [Храмов, 2007; Храмов, Иосифиди 2012] на основе анализа подробных записей геомагнитных инверсий в палеозое и мезозое обосновано, что экваториальный диполь, вклад которого в межинверсионные периоды не более 5%, во время инверсий способен поддерживать магнитное поле величиной до 10-20% от поля до и после инверсии. При этом ось экваториального диполя находится в одной и той же плоскости, т.е. сохраняет квазистационарное положение.

Заметный вклад в суммарное магнитное поле вносят мировые магнитные аномалии (ММА) [Alken et al., 2021; Provatidis et al., 2024]. Три максимума величины магнитной индукции: Восточно-Сибирский, Канадский, Антарктический и один минимум – Бразильский, образованы слабыми токами, возникающими, как предполагается, в области пространственно сближенной или непосредственно отвечающей LLSVP [Добрецов и др., 2021]. Поскольку экваториальный диполь также как аксиальный может испытывать инверсии [Храмов, Иосифиди, 2012], то в момент снижения и ЦОД, и экваториального диполя, намагничивание пород, вероятно, будет осуществляться на ближайшую к точке опробования ММА, возможно, с небольшим вкладом секториальных гармоник главного геомагнитного поля.

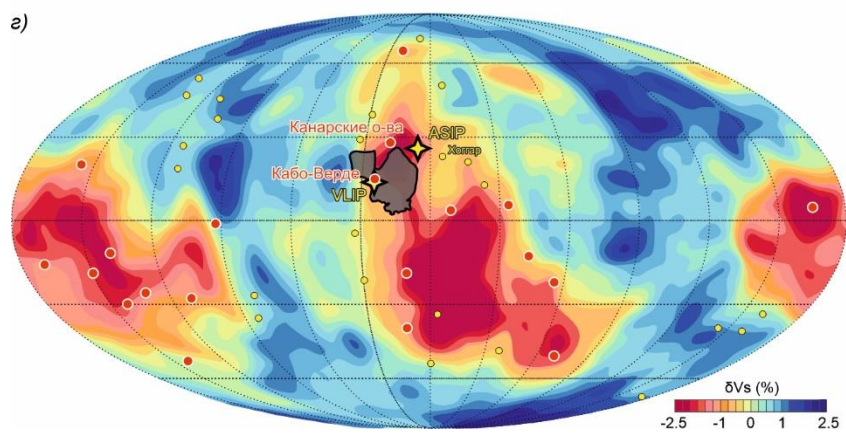
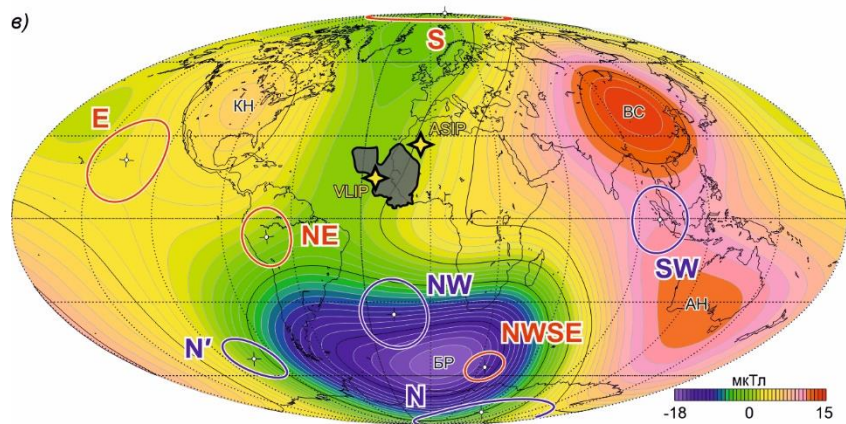
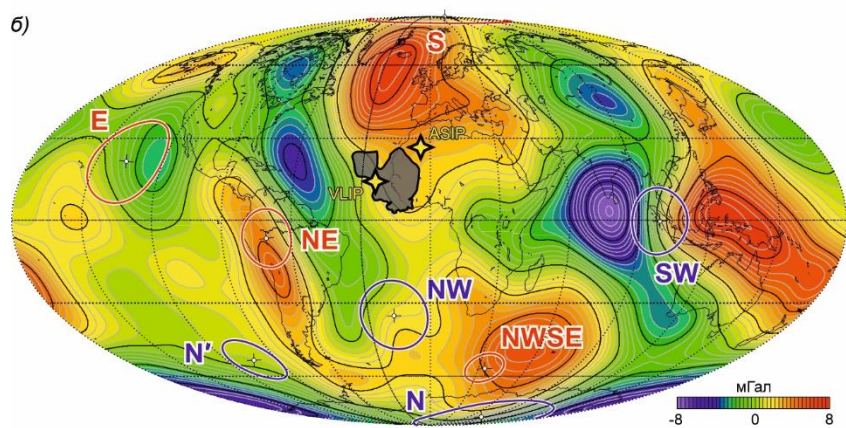
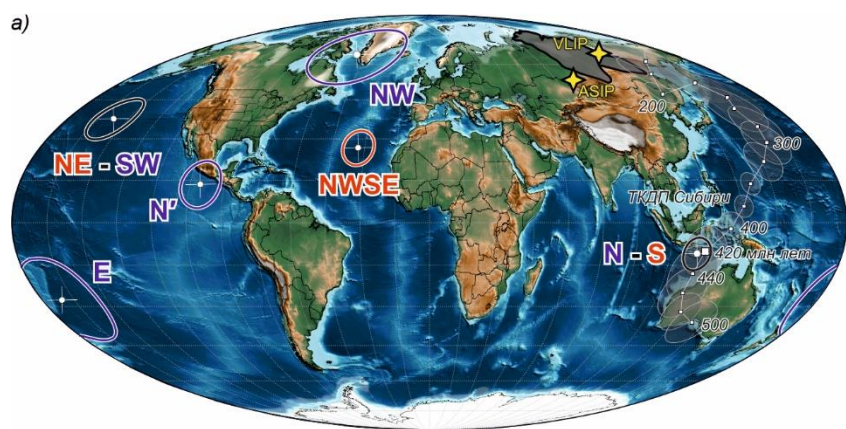
Наилучшим образом проиллюстрировать такую модель можно на примере анализа палеомагнитных направлений, записанных в девонских базитах Минусинского прогиба [Шацилло, Павлов, 2019; Метелкин и др., 2025]. Их формирование связывают с эпизодом плюмового магматизма, результатом которого стало образование Алтае-Саянской рифтовой системы и соответствующего магматического ареала ASIP, объединяющего также структуры Тувинского, Делюно-Юстыгского прогибов и смежных грабенов Северо-Западной Монголии [Ярмолук, Воронцов, 1993; Ярмолук и др., 2000; Кузьмин и др., 2011; Воронцов и др., 2013, 2023]. Начало этих событий, согласно биостратиграфическим и геохронологическим оценкам на территории Минусинского прогиба, соответствует пражско – эмскому интервалу нижнего девона и завершилось в начале живета [Бабин и др., 2004; Лавренчук и др., 2004; Воронцов и др., 2013, 2023; Краснов и др., 2018]. Таким образом, возраст магматизма, даже при самой осторожной оценке, ограничен интервалом 411 – 387 млн лет.

Выполненный комплекс лабораторных экспериментов фиксирует крайне изменчивую палеомагнитную запись. Зачастую даже в одном магматическом теле (потоке, покрове, силле) векторы характеристической намагниченности рассеяны так, что лишь только несколько из них близки по направлению друг другу. При этом петромагнитные критерии, подкрепленные результатами электронной микроскопии, свидетельствуют о соответствии фиксируемой записи моменту формирования ASIP [Метелкин и др., 2025]. Для поиска регулярного сигнала, скрытого в имеющейся псевдохаотической выборке, выполнен агломеративный кластерный анализ. В результате этой процедуры установлено 8 групп палеомагнитных направлений, которые, согласно модели, могут отражать быстро меняющуюся структуру раннедевонского поля, т.е. соответствовать попеременно преобладающим центрам намагничивания в эпоху ультрачастых инверсий и соответственно низкого диполя. Среди установленных групп выделяются два биполярных распределения S-N и NE-SW, которые могут соответствовать записи диполя (табл. 2). Угловое расстояние между их полюсами составляет в среднем  $93.2^\circ \pm 6.6^\circ$ . Такое ортогональное положение подчеркивает предполагаемую связь с обеими гармониками главной дипольной составляющей земного магнитного поля. На рисунке 5а видно, что при сопоставлении установленных полюсов с траекторией кажущегося движения полюса (ТКДП) для Сибири видно, координаты среднего полюса для S-N после обращения совпадают с ожидаемым для раннего девона (420 - 410 млн лет с учетом ошибки определения). Таким образом палеомагнитные направления кластера S-N мы отождествляем с полем ЦОД. Направления NE-SW, в таком случае, логично связать с экваториальным диполем.

Анализ геомагнитных данных предполагает связь ориентировки оси экваториального диполя с асимметрией внутреннего твердого ядра [Храмов, Иосифиди, 2012]. Сейсмические картины уверенно показывают, что оно смещено примерно на 100 км в сторону западного полушария, имея как бы два полюса: с одной стороны – под Экватором на  $\sim 280^\circ$  в.д., с другой – у побережья Суматры,  $\sim 100^\circ$  в.д. [Buffett, 2010; Deuss et al., 2010; Monnereau et al., 2010]. Там же фиксируются две крупные аномалии гравитационного поля противоположного знака (положительная на востоке и отрицательная на западе), также отражающие нижнемантийные неоднородности (рис. 5б) [Добрецов и др., 2021]. По всей видимости их существование имеет аналогичную природу. Считается, что наблюдаемая асимметрия твердого ядра Земли является результатом мегаимпакта на этапе ее аккреции, либо имеет другую причину, но возникло на самой ранней стадии эволюции планеты [Origin..., 2000; Терез, Герасимов, 2009; Храмов, Иосифиди, 2012]. В таком случае, ориентировка оси экваториального диполя, также как аксиального, должна быть постоянной.

**Таблица. 2.** Наблюдаемые девонские палеополюсы Минусинского прогиба по [Метелкин и др. 2025]

Палеополюс	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	A95
S	-11.2	112.9	6.0
N	9.2	301.5	9.8
Среднее S-N	-11.1	114.1	5.3
NE	40.7	203.8	9.6
SW	-35.5	16.5	10.7
Среднее NE-SW	37.8	199.5	7.0
N'	13.6	256.9	7.6
NW	-27.9	186.2	14.8
NWSE	65.1	301.6	11.6
E	26.9	324.3	4.6



**Рис. 5.** Сопоставление наблюдаемых палеополюсов (синий обозначает отрицательное наклонение палеомагнитного вектора, красный – положительное) девона Минусинского ареала ASIP (табл. 2) с ТКДП Сибири по [Метелкин и др., 2012] (а), их реконструированное расположение на картах: аномалий гравитационного поля в свободном воздухе на высоте 1500 км, заимствовано из [Добрецов и др., 2021] (б); главного магнитного поля за вычетом дипольной составляющей (фактическое поле ММА), где буквами обозначены центры ММА: КН – Канадская, ВС – Восточно-Сибирская, АН – Антарктическая, БР – Бразильская (в); реконструированное по палеомагнитным данным положение Сибири относительно LLSVP и горячих точек, желтой звездой показаны ареалы ASIP и VLIP (г).

Опираясь на эти выводы, мы попытались совместить установленные полюсы NE – SW в палеокоординатах Сибири с соответствующими гравитационными экстремумами (рис. 5б). Для этого сначала, зная координаты полюсов ЦОД (N – S) стандартным приемом (совмещение согласно наклонению векторов N и S с южным и северным географическим полюсом, соответственно) реконструированы ориентировка в пространстве и палеоширотное положение Сибири. Затем простым поворотом вокруг оси вращения (смещением вдоль широты) достигается совпадение полюсов NE – SW с предполагаемыми полюсами экваториального диполя. Наилучшее, на наш взгляд совпадение достигается при смещении ASIP к 0° меридиану. При таком расположении палеополюсы других выявленных кластеров (табл. 1) также имеют совпадение с аномалиями гравитационного или магнитного поля. В частности, полюс NW мы отождествляем с Бразильской ММА, которая согласно представленной карте (рис. 5в) могла определять магнитное поле в момент нулевого поля ЦОД и экваториального диполя. Идентификация палеополюсов NWSE, E и N' менее очевидна. Выделение таких кластеров палеомагнитных направлений из общего рассеянного распределения наблюдаемых векторов естественной остаточной намагниченности, может быть обусловлено недостатками в статистике данных или отражать эффект сложения разных компонент главного геомагнитного поля в момент снижения ЦОД [Метелкин и др., 2025]. К примеру полюс N' может быть «транзитным» к N и описывает влияние экваториального диполя, других незональных гармоник и/или Бразильской ММА в момент инверсии. Аналогичный эффект, т.н. асимметрии инверсий, когда наблюдаемые противоположные полюсы ЦОД отличаются менее чем на 180° отмечается для других временных интервалов палеозоя и мезозоя [Храмов, 2007; Храмов, Иосифиди, 2012].

Направления NWSE могут быть суперпозицией N и NW, являться результатом сложения дипольного и аномалийного поля, когда их величина была соизмеримой. Однако, обращает на себя внимание факт совпадения палеополюсов NWSE и E с центрами гравитационного максимума у берегов Антарктиды и локального минимума у калифорнийского побережья Северной Америки, соответственно. Природа этих аномалий достоверно не ясна, однако можно предположить их связь, например, с квадрупольной или октупольной составляющими главного геомагнитного поля. Учитывая положительный знак наклонения для направлений NWSE, предпочтительней выглядит интерпретация этого полюса в связи с Приантарктической гравитационной аномалией. Если этот вывод справедлив, то полюс E, также отвечающий положительному наклонению палеомагнитных векторов, скорее нужно считать артефактом. Отметим, что обоснованность этого кластера наиболее низкая и не исключено, что его обособление из общей выборки палеомагнитных векторов обусловлено недоучетом тектонического фактора [Метелкин и др., 2025].

Таким образом, в рамках наших построений, аномально сложная запись раннедевонского магнитного поля в базальтах Минусинского прогиба ASIP обусловлена значительным вкладом в поле ЦОД незональных компонент, главным образом, экваториального диполя, а также поля ММА. Это заставляет постулировать их псевдофиксированное (с учетом собственных вариаций) расположение в течение очень длительного времени, по сути, с момента запуска геодинамо в режиме схожем с современным. Это создает благоприятные предпосылки для обоснования новой, т.н. «аномалийной» системы отсчета для палеотектонических построений, позволяющей на основе палеомагнитных

данных восстанавливать палеогеографическое положение блоков земной коры не только по широте, но и долготе.

Достоверность этого вывода подтверждается сравнением выполненных реконструкций с реконструкциями, основанными на обсуждавшейся выше гипотезе фиксированных горячих точек. Так, согласно построениям М.И. Кузьмина с соавторами [Kuzmin et al, 2010], формирование ASIP и субсинхронной ей VLIP на востоке Сибирской платформы может быть отождествлено с плюмами генерировавшимися в пределах характерного минимума LLSVP под северо-западной окраиной Африки. В нашей интерпретации, с использованием аномалийной системы координат, VLIP оказывается непосредственно над горячей точкой Кабо-Верде, а ASIP может быть сопоставлена с Канарским плюмом или плюмом Хоггар, первичная природа которого обсуждается [French, Romanowicz, 2015] (рис. 5г). Небольшое различие в координатах ASIP и горячими точками может быть обусловлено многими причинами. В том числе ошибками в палеомагнитных определениях, в сопоставлении с аномалийной системой координат, отклонением плюма от горячей точки с формированием пространственно обособленной вторичной камеры и прочее.

В соответствие с предлагаемой концепцией также может быть описан вендский геомагнитный феномен. Картина распределения палеомагнитных векторов для венда – раннего кембрия отличается от девонской тем, что в палеомагнитной записи обычно обособливается присутствие двух групп. Палеополус первой располагается к юго-востоку от Австралии вплоть до побережья Антарктиды и был намечен в работах А.Н. Храмова [Храмов и др., 1982] (далее KHR) (рис. 6а). Полнос KHR неоднократно подтвержден фактическими данными и согласно модели ЦОД указывает на высокоширотное положение Сибири в Южном полушарии [Павлов и др., 2004, 2018, Шацилло и др., 2020]. Палеополус второй группы для времен ~ 580 – 560 млн лет, находится вблизи восточного побережья о. Мадагаскар, впервые обоснован в [Kirschvink, Rozanov, 1984] (далее KRS) и в интерпретации ЦОД, постулирует приэкваториальное положение Сибирского палеоконтинента [Kravchinsky et al., 2001; Казанский, 2002; Метелкин и др., 2005, 2012]. Недавние палеомагнитные исследования осадочных последовательностей юга Сибири позволили зафиксировать присутствие KHR и KRS компонент даже на уровне одного образца, что также подтверждает факт ультрачастых инверсий и предполагаемый вклад в геомагнитное поле венда недипольных источников [Виноградов и др., 2023, 2025]. При этом полюс KRS испытывает пока слабо диагностируемый тренд к смещению на восток к раннепалеозойским полюсам Сибири и имеет характерную для диполя биполярную запись, а KHR компонента монополярная (положительного наклонения), что, в рамках нашей модели, указывает на его вероятную связь с незональными компонентами главного магнитного поля или ММА. Кроме прочего интерпретация палеомагнитных данных затруднена из-за недостатка качественного обоснования возраста пород. На территории Сибири преобладают преимущественно осадочные последовательности, взгляды на стратиграфию которых до сих пор вызывают дискуссии. В итоге практически весь венд – кембрийский (580 – 500 млн лет) участок ТКДП Сибири является результатом интерполяции между относительно хорошо обоснованными неопротерозойским и палеозойским рядами наблюдаемых палеомагнитных полюсов [Метелкин и др., 2012]. Так на рисунке 6а показан один из результатов такой интерполяции (использован сплайн метод) выполненный на основе ТКДП Сибири по [Метелкин и др., 2012] с учетом полученных в последнее время ключевых определений по венду-кембрию [Виноградов и др., 2025].

К числу магматических проявлений соответствующего возраста, которые могут иметь связь с плюмами, отнесены базиты тас-юряхского комплекса Оленекского поднятия (530 - 540 млн лет) [Chayka et al., 2025]. Выполненные палеомагнитные исследования позволили изолировать KHR компоненту прямой по знаку наклонения полярности (координаты палеополюса: 72.3° с.ш. 28.2° в.д. A95=12.9°), которая, согласно авторской интерпретации, отражает намагничивание на Антарктическую ММА [Метелкин и др., 20226]. За полюс аномального намагничивания была принята точка с координатами 65° ю.ш. 135 в.д.°, отвечающая центру Антарктического максимума

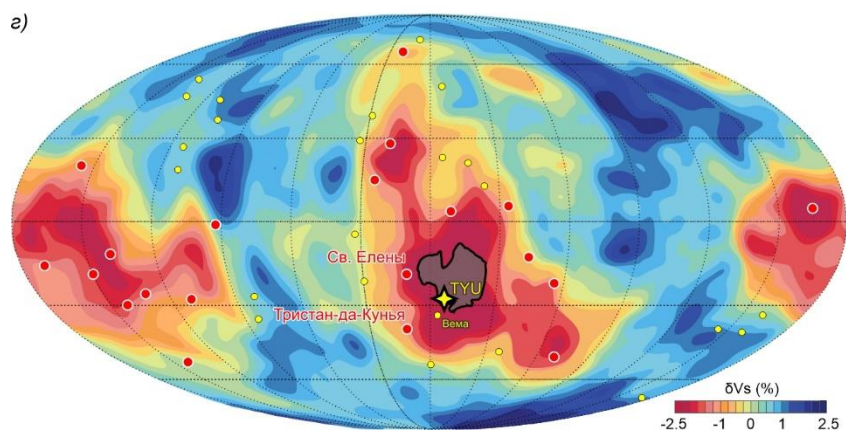
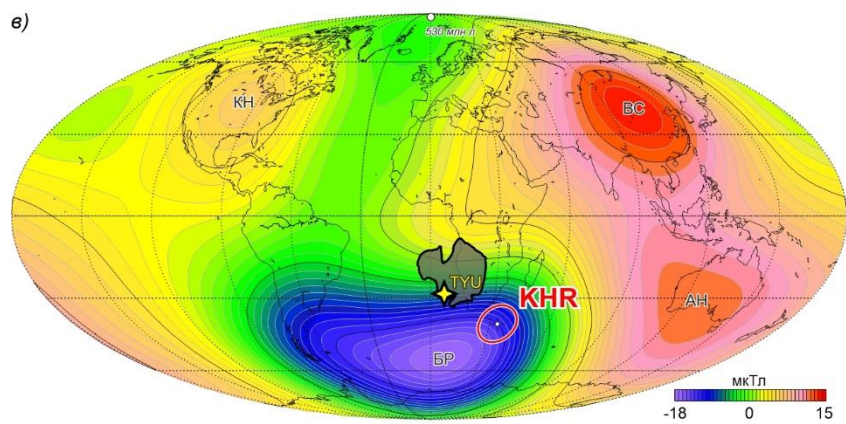
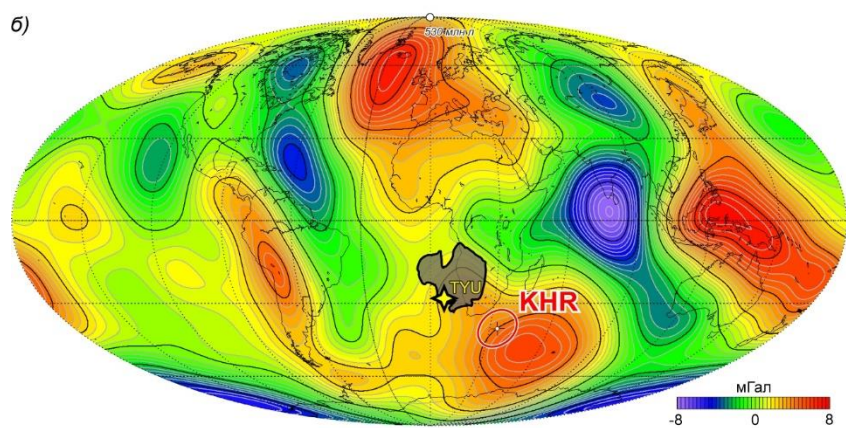
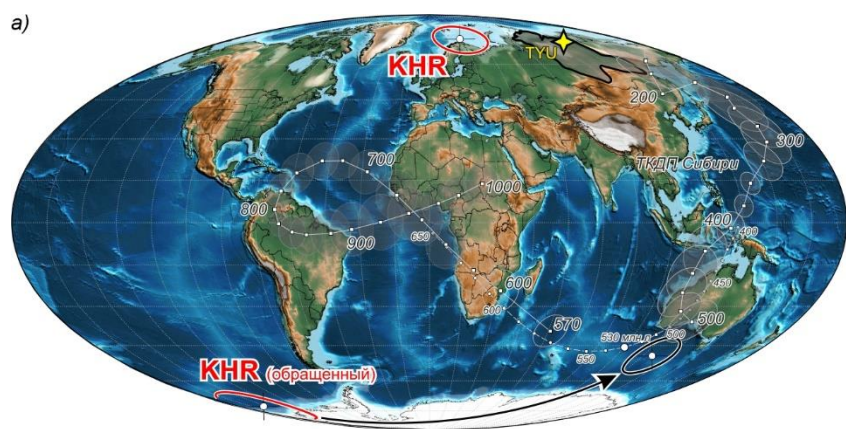


на карте общего модуля главного магнитного поля на эпоху 2020-2025 годов по модели IGRF-13 [Thébault et al., 2015]. Для совмещения системы координат аномального поля с полем ЦОД был вычислен эйлеров поворот ( $100^\circ$  по часовой стрелке вокруг точки с координатами  $74^\circ$  с.ш.,  $276^\circ$  в.д.), необходимый для одновременного совмещения принятого центра ММА с Южным географическим полюсом (= полюсом ЦОД), и наблюдаемых КНР полюсов с участком ТКДП Сибири, соответствующего возраста [Метелкин и др., 2022б]. Позднее правдоподобность таких построений неоднократно подтвердилась. С помощью указанного эйлерового поворота удастся добиться хорошего схождения КНР и KRS, обнаруженных в одних и тех же разрезах тасеевской и вороговской серий юго-западной окраины Сибирской платформы [Виноградов и др., 2023, 2025]. И, согласно выполненным интерпретациям, компонента КНР в сибирских разрезах связана со стационарным аномалийным источником, который находился ближе всего к палеоконтиненту и определял структуру венд-раннекембрийского геомагнитного поля в моменты ультрачастых инверсий и, соответственно, низкой величины главной дипольной составляющей, записанной в KRS.

Тем не менее, запись только одного аномального источника, в совокупности с недостатком данных о полюсах ЦОД, затрудняет использование аномалийной системы координат для абсолютных реконструкций. В том числе, справедливость отождествления КНР именно с Антарктической ММА не трудно поставить под сомнение. Координаты центра этого геомагнитного максимума (как и всех остальных ММА) в случае вычитания из общего модуля дипольной составляющей, будут значительно сдвинуты.

Для верификации наших реконструкций и поиска палеогеографического положения максимально удовлетворяющего как палеомагнитным данным, так и гипотезе стационарных горячих точек, выполнены те же процедуры, что и при интерпретации девонских палеополюсов (см рис. 6). В качестве полюса ЦОД для восстановления палеошироты Оленекского поднятия 530 млн лет назад во время формирования базитов тас-юряхского комплекса использованы координаты соответствующей точки на интерполированном участке ТКДП:  $46^\circ$  ю.ш.  $105^\circ$  в.д. (рис. 6а). Реконструированное, в соответствие с этими координатами, ориентировка в пространстве Сибирского кратона и наблюдаемого полюса КНР изображена на картах аномалий гравитационного (рис. 6б) и магнитного (рис. 6в) поля. Опираясь только на принципы аномалийной системы координат, реконструированную систему «Сибирский кратон – полюс КНР», сдвигая вдоль широты, можно удачно сопоставить как с Антарктической, так и Бразильской ММА. Однако, в первом случае, палеоположение Сибири у западного побережья Австралии, крайне далеко от восстановленного для девона (см рис. 5), будет предполагать нереалистично высокие скорости дрейфа в течение раннего палеозоя. Соотнесение с Бразильской ММА, учитывая принцип минимизации перемещений, более правдоподобно. Хорошее согласие в расположении полюса КНР можно наблюдать также с Приантарктическим максимумом гравитационного поля. О потенциальной генетической связи этой гравитационной аномалии с одним из вероятных источников, поддерживающих магнитное поле Земли в эпохи низкого диполя, мы говорили выше, при расшифровке записи компоненты NWSE в девонских базальтах ASIP. В этом контексте нельзя исключить, что КНР намагничивание во время вендского геомагнитного минимума также обусловлено его влиянием.

В предлагаемом варианте реконструкции (см рис. 6) полюс КНР в равной степени близок центрам Приантарктической гравитационной аномалии и Бразильской ММА, а плюм Вема оказывается в непосредственной близости от точки наблюдения на территории Оленекского поднятия (рис. 6г). Хотя плюм Вема согласно классификации [Courtillet et al., 2003; French, Romanowicz, 2015] относится к малоглубинным вторичным плюмам, тем не менее, может быть связан с эволюцией Африканской LLSVP [Steinberger et al., 2000]. Наиболее близко расположенным первичным нижнемантийным плюмом, отголоски которого, в рамках наших построений, могли стать причиной формирования тас-юряхских базитов, является Тристан-да-Кунья или плюм Св. Елены (рис. 6г).



**Рис. 6.** Сопоставление наблюдаемых палеополюсов тас-юрьхского магматического комплекса по [Метелкин и др., 2022б] с ТКДП Сибири по [Метелкин и др., 2012] с дополнениями полюсов для венда [Виноградов и др., 2023], включая результаты сплайн-интерполяции, показанные точками (а); реконструированное расположение полюсов и соответствующее положение Сибирского палеоконтинента на картах: аномалий гравитационного поля в свободном воздухе на высоте 1500 км, заимствовано из [Добрецов и др., 2021] (б); главного магнитного поля за вычетом дипольной составляющей (фактическое поле ММА), где буквами обозначены центры ММА: КН – Канадская, ВС – Восточно-Сибирская, АН – Антарктическая, БР – Бразильская (в); реконструированное по палеомагнитным данным положение Сибири относительно LLSVP и горячих точек, желтой звездой показано положение тас-юрьхского магматического ареала (TYU) (г).

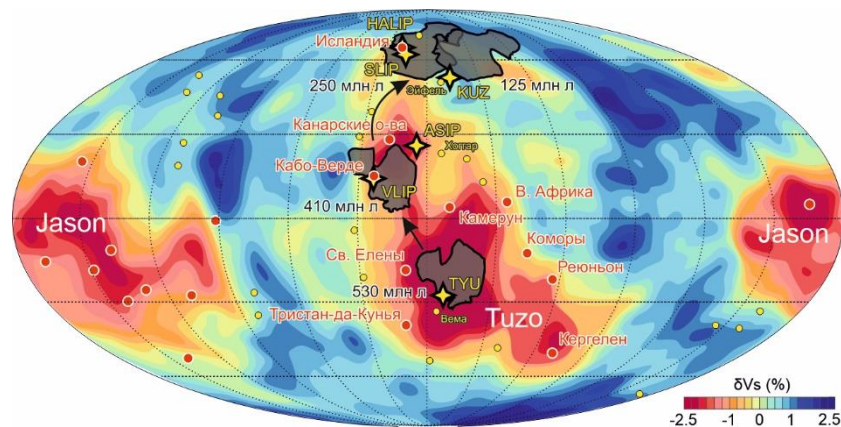
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог выполненным построениям, прежде всего, нужно еще раз подчеркнуть, что длиннопериодные (миллионы, десятки и сотни миллионов лет) вариации геомагнитного поля неразрывно связаны с плюмовым магматизмом. В настоящей работе мы рассмотрели только один из фундаментальных аспектов этой взаимосвязи. На основе современных данных вновь подтверждены идеи Н.Л.Добрецова [Добрецов и др., 2001, 2021, Добрецов, 2005, 2010] о синхронизации периодичностей активизации нижнемантийных плюмов, изменения режима работы гидромагнитного динамо и глобальных тектонических событий. Важнейшее место в этой системе отводится границе ядро – мантия. От ее состояния зависит температурный режим и особенности конвекции как мантийной, так и внешнего ядра. Плюмы являются регулятором температурного режима этой границы и, соответственно, контролируют состояние геодинамо. При этом современный набор палеомагнитных данных подтверждает реалистичность фиксированного положения точек генерации нижнемантийных плюмов исключительно длительное время.

Регулирующая роль плюмов и ее отражение в квазипериодических колебаниях различных численных параметров, связанных с глобальной тектоникой и геодинамикой, рассматривается во многих современных работах. Модели, построенные на основе их сопоставлений, включая численные статистические методы оценки регулярности тектоно-магматических событий, предлагают различные, иногда противоположные, причинно-следственные механизмы изменения таких важнейших характеристик геомагнитного поля, как частота инверсий и его напряженность [Диденко, 1998, 2011; Литасов, Шацкий 2016; Hounslow et al., 2018; Biggin et al., 2020; Геологическая эволюция..., 2021; Добрецов и др., 2021]. Выполненный сугубо качественный анализ, приводит нас к мысли о том, что эпизодам крупных плюмовых событий предшествует рост частоты инверсий, свидетельствующий о разогреве внешнего ядра и активизации конвективных течений. Согласно представленным данным период повторяемости этапов резкого учащения инверсий за последние 600 млн лет составляет 70 – 100 млн лет. Это мало отличается от оценок, выполненных с использованием численных моделей [Диденко, 2011]. При этом события раннего этапа геологической истории, согласно имеющейся палеомагнитной базе, были более интенсивными. Согласно нашим представлениям перегрев ядра мог быть настолько значительным, что режим конвекции имел характер близкий турбулентному длительное (десятки млн лет) время. Возникающие вследствие этого ультрачастые обращения магнитного диполя привели к тому, что величина дипольного магнитного момента, составляющая в периоды между инверсиями более 90% всего суммарного поля, не успевала восстанавливать свои нормальные значения. Это в различной степени искажало обычную палеомагнитную запись, а в моменты ультранизкого магнитного диполя могла быть полностью заменена полем, генерируемым слабыми источниками главного геомагнитного поля, включая ММА. В частности, быстрым чередованием ультракратких эпизодов преобладающего нормального и аномалийного поля мы предлагаем объяснять вендский и девонский геомагнитный феномен, когда в палеомагнитной записи фиксируется сразу несколько полюсов, взаимная конфигурация которых отличается от диполя.

Так в сложной палеомагнитной записи магматических пород девона Минусинского прогиба кроме обычной составляющей – аксиального диполя, удается различить экваториальный диполь, возможно, полюсы незональных компонент квадрупольной или октупольной составляющих, а также Бразильской ММА. Значительный вклад аномалийного источника идентифицируется и для венда. Показано, что полюсы незональных компонент могут быть связаны с наблюдаемым эффектом асимметрии внутреннего ядра и отражены крупными глубинными аномалиями гравитационного поля, а ММА сопряжены с мантийными неоднородностями на границе ядро – мантия, в том числе продуцирующих плюмы. Весь комплекс анализируемых данных и теоретические предпосылки указывают на квазистационарное расположение рассматриваемых аномалийных источников в течение всей истории геомагнитного поля или, как минимум, последние 600 млн лет. Таким образом, в случае их распознавания в палеомагнитной записи становится возможно восстанавливать палеогеографическое положение блоков земной коры не только по широте, но и долготе.

Пример сочетание приемов абсолютных реконструкции, основанных на гипотезе фиксированных горячих точек и новой аномалийной системе координат, представлен на рисунке 7. Показано, что Сибирский кратон на протяжении большей части своей позднедокембрийско – фанерозойской истории находился в области влияния Африканского (Tuzo) горячего поля. С начала палеозое по мезозой, включительно, он испытал преимущественный субмеридиональный дрейф из области средних широт Южного полушария к высоким широтам Северного полушария, оставаясь в полосе между 30° з.д. и 30° в.д. За это время литосфера Сибири неоднократно оказывалась в области влияния крупных нижнемантийных плюмов. В частности, представленные реконструкции указывают на стационарность Исландской горячей точки минимум 250 млн лет, горячих точек северной Атлантики (Кабо-Верде, Канарской) до ~ 400 млн лет, а Тристан-да-Кунья, возможно, более 530 млн лет.



**Рис. 7.** Реконструированное положение Сибири и связанных с ней плюмовых магматических провинций относительно LLSVP и горячих точек.

Авторы отдают себе отчет в том, что современная доказательная база гипотезы «фиксированных магнитных аномалий» еще слишком мала. Соответственно выполненные построения и следующие из них научные заключения будут подвергаться справедливой критике. Пока это лишь первый шаг, относительно логичное предположение, подкрепленное единичными фактами. Его развитие требует всестороннего обоснования, как на примере палеомагнетизма Сибири, так и других континентальных областей с использованием строгих численных статистических критериев оценки. Представленная модель геомагнитного поля также в большой степени абстрактная и нуждается в подтверждении с позиций теории геомагнетизма и численного моделирования. Тем не менее, мы искренне надеемся,



что высказанные нами идеи будут не просто замечены, а сподвигнут к пересмотру накопленных рядов палеомагнитных данных с нового ракурса.

## БЛАГОДАРНОСТИ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы искренне признательны академику РАН А.Н. Диденко и чл.-корр. РАН А.Э. Изоху за конструктивную критику, комментарии и предложения по развитию настоящего исследования.

Работа выполнена при поддержке РНФ проект 25-17-00040 (в части анализа данных по структурам Южной Сибири и модельных построений) и проект 24-17-00057 (в части анализа данных по арктическим окраинам). Тематика исследования скоординирована с программой фундаментальных научных исследований РАН и Минобрнауки (FWZZ–2022–0001 и FSUS–2025–0008).

## ЛИТЕРАТУРА

- Абашев В.В., Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Васюкова Е.А., Михальцов Н.Э. (2020). Раннемеловой возраст базальтов архипелага Земля Франца-Иосифа: соответствие новых  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  и палеомагнитных данных // ДАН, т. 493, № 1, с. 16—20, DOI: 10.31857/S2686739720070038.
- Абашев В.В., Метелкин Д.В., Елисеев А.А., Верниковский В.А., Михальцов Н.Э., Виноградов Е.В. (2024). Напряженность магнитного поля Земли в раннем мелу по результатам изучения траппов архипелага Земля Франца-Иосифа // ДАН, т. 519, № 1, с. 5—11, DOI: 10.1134/S1028334X2460275X.
- Абашев В.В., Метелкин Д.В., Михальцов Н.Э., Верниковский В.А., Брагин В.Ю. (2018). Палеомагнетизм траппов архипелага Земля Франца-Иосифа // Геология и геофизика, т. 59, № 9, с. 1445—1468, DOI: 10.15372/GiG20180910.
- Бабин Г.А., Владимиров А.Г., Крук Н.Н., Сергеев С.А., Сенников Н.В., Гибшер А.С., Советов Ю.К. (2004). Возраст заложения Минусинских впадин (Южная Сибирь) // ДАН, т. 395, № 3, с. 367—370.
- Борисенко А.С., Сотников В.И., Изох А.Э., Поляков Г.В., Оболенский А.А. (2006). Пермотриасовое оруденение Азии и его связь с проявлением плюмового магматизма // Геология и геофизика, т. 47, № 1, с. 166—182.
- Буслов М.М., Сафонова И.Ю., Федосеев Г.С., Рейков М., Дэвис К., Бабин Г.А. (2010). Пермотриасовый плюмовый магматизм Кузнецкого бассейна (Центральная Азия): геология, геохронология, геохимия // Геология и геофизика, т. 51, № 9, с. 1310—1328.
- Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В., Матушкин Н.Ю., Кулаков И.Ю. (2013). Проблемы тектоники и тектонической эволюции Арктики // Геология и геофизика, т. 54, № 8, с. 1083—1107.
- Виноградов Е.В., Метелкин Д.В., Абашев В.В., Верниковский В.А., Матушкин Н.Ю., Михальцов Н.Э. (2023). Палеомагнетизм тасеевской серии (Енисейский кряж): к проблеме конфигурации геомагнитного поля на рубеже докембрия-фанерозоя // Геология и геофизика, т. 64, № 5, с. 655—673, DOI: 10.15372/GiG2022153.
- Виноградов Е.В., Метелкин Д.В., Летникова Е.Ф., Косарева Л.Р., Абашев В.В., Вишневская И.А. (2025). Палеомагнетизм вороговской серии Енисейского кряжа: к обоснованию вендского геомагнитного феномена // Геология и геофизика, т. 66, № 4, с. 441—462, DOI: 10.15372/GiG2024179.
- Воронцов А.А., Коваленко Д.В., Ярмолюк В.В., Никифоров А.В., Перфилова О.Ю. (2023). Геологические и изотопно-геохимические индикаторы плюм-литосферных взаимодействий в юго-западном обрамлении Сибирского кратона: синтез данных для раннедевонских магматических ассоциаций Алтае-Саянской рифтовой системы // Геология и геофизика, т. 64, № 12, с. 1674—1689, DOI: 10.15372/GiG2023156.
- Воронцов А.А., Федосеев Г.С., Андрющенко С.В. (2013). Девонский вулканизм Минусинского прогиба Алтае-Саянской области: геологические, геохимические и изотопные Sr-Nd характеристики пород // Геология и геофизика, т. 54, № 9, с. 1283—1313.



- Геологическая эволюция Земли: от космической пыли до обители человечества. (2021).** Отв. ред. М.И. Кузьмин, В.В. Ярмолюк – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео». 327 с.
- Диденко А.Н. (1998).** Стомиллионлетние вариации в палеозое и о связи процессов в ядре и литосфере // Физика Земли, № 5, с. 3—10.
- Диденко А.Н. (2011).** О возможной причине квазипериодических колебаний частоты геомагнитных инверсий и величины  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в морских карбонатных породах в фанерозое // Геология и геофизика, т. 52, № 12, с. 1945—1956, DOI: 10.15372/GiG20111210.
- Добрецов Н.Л. (1994).** Периодичность геологических процессов и глубинная геодинамика // Геология и геофизика, т. 35, № 5, с. 5—19.
- Добрецов Н.Л. (1997).** Пермо-триасовые магматизм и осадконакопление в Евразии как отражение суперплюма // ДАН, т. 354, № 2, с. 220—223.
- Добрецов Н.Л. (2005).** Крупнейшие магматические провинции Азии (250 млн лет): сибирские и эмейшаньские траппы (платобазальты) и ассоциирующие гранитоиды // Геология и геофизика, т. 46, № 9, с. 870—890.
- Добрецов Н.Л. (2010).** Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // Геология и геофизика, т. 51, № 6, с. 761—784, DOI: 10.1016/j.rgg.2010.05.001.
- Добрецов Н.Л. (2011).** Раннепалеозойская тектоника и геодинамика Центральной Азии: роль раннепалеозойских мантийных плюмов // Геология и геофизика, т. 52, № 12, с. 1957—1973.
- Добрецов Н.Л. (2015).** О периодичности и разномасштабных факторах вулканических извержений // Геология и геофизика, т. 56, № 12, с. 2107—2117, DOI: 10.15372/GiG20151201.
- Добрецов Н.Л. (2020).** Взаимодействие тектоники плит и тектоники плюмов: вероятные модели и типичные примеры // Геология и геофизика, т. 61, № 5-6, с. 617—647, DOI: 10.15372/GiG2020102.
- Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М. (2010).** Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // Геология и геофизика, т. 51, № 9, с. 1159-1187.
- Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Карякин Ю.В., Кораго Е.А., Симонов В.А. (2013).** Мезозойско-кайнозойский вулканизм и этапы геодинамической эволюции Центральной и Восточной Арктики // Геология и геофизика, т. 54, № 8, с. 1126—1144.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. (2001).** Глубинная геодинамика. Новосибирск, Изд-во СО РАН филиал «Гео», 408 с.
- Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В., Василевский А.Н. (2021).** Характерные свойства магнитного и гравитационного полей Земли, взаимосвязанные с глобальной и региональной тектоникой // Геология и геофизика, т. 62, № 1, с. 10—30, DOI: 10.15372/GiG2020181.
- Добрецов Н.Л., Чумаков Н.М. (2001).** Глобальные изменения природной среды. Новосибирск, Изд-во СО РАН филиал «Гео», с. 11—26.
- Елисеев А.А., Метелкин Д.В., Абашев В.В., Михальцов Н.Э., Виноградов Е.В., Брагин В.Ю. (2024).** Палеомагнетизм абинской серии Кузнецкого прогиба (Южная Сибирь) в связи с проблемой формирования Сибирской крупной магматической провинции на рубеже перми и триаса // Геология и геофизика, т. 65, № 4, с. 533—551, DOI: 10.15372/GiG2023205.
- Елисеев А.А., Щербакова В.В., Метелкин Д.В., Михальцов Н.Э., Жидков Г.В., Абашев В.В., Рогов А.М. (2022).** Низкая напряженность геомагнитного поля на рубеже перми и триаса по результатам исследования траппов Кузнецкого прогиба (Южная Сибирь) // Геология и геофизика, т. 63, № 2, с. 230—246, DOI: 10.15372/GiG2021133.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. (1990).** Тектоника литосферных плит территории СССР. Москва, Недра, т. 1, 327 с.; т. 2, 334 с.
- Изох А.Э., Вишневский А.В., Поляков Г.В., Калугин В.М., Оюунчимэг Т., Шелепаев Р.А., Егорова В.В. (2010).** Урэгнурская платиноносная вулканоплутоническая пикрит- базальтовая ассоциация Монгольского Алтая - индикатор кембро-ордовикской крупной изверженной провинции // Геология и геофизика, т. 51, № 5, с. 665-681.

- Изох А.Э., Вишневский А.В., Поляков Г.В., Шелепаев Р.А. (2011).** Возрастные рубежи пикритового и пикродолеритового магматизма Западной Монголии // Геология и геофизика, т. 52, № 1, с. 10-31.
- Казанский А.Ю. (2002).** Эволюция структур западного обрамления Сибирской платформы по палеомагнитным данным: автореф. дис. .... д. н. Новосибирск, Объед. ин-т геологии, геофизики и минералогии СО РАН, 40 с.
- Казанский А.Ю., Казанский Ю.П., Сараев С.В., Москвин В.И. (2000).** Граница перми и триаса в вулканогенно-осадочном разрезе Западно-Сибирской плиты по палеомагнитным данным (по материалам изучения керна Тюменской сверхглубокой скважины СГ-6) // Геология и геофизика, т. 41, № 3, с. 327—339.
- Казанский А.Ю., Метелкин Д.В., Брагин В.Ю., Кунгурцев Л.В. (2005).** Палеомагнетизм пермотриасового траппового комплекса Кузнецкого прогиба (Южная Сибирь) // Геология и геофизика, т. 46, № 11, с. 1107—1120.
- Карякин Ю.В., Шипилов Э.В. (2009).** Геохимическая специализация и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраст базальтоидного магматизма островов Земля Александры, Нортбрук, Гукера и Хейса (архипелаг Земля Франца-Иосифа) // ДАН, т. 425, № 2, с. 1—5.
- Кирдяшкин А.Г., Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.А. (2000).** Турбулентная конвекция и магнитное поле внешнего ядра Земли // Геология и геофизика, т. 41, № 5, с. 601—612.
- Краснов В.И., Перегоедов Л.Г., Ратанов Л.С., Берзон Е.И., Барсегян В.Е., Косоруков А.П., Махлаев М.Л., Сенников Н.В., Федосеев Г.С. (2018).** Региональная стратиграфическая схема девонских образований восточной части Алтае-Саянской области. Новосибирск, СНИИГГиМС, 52 с.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Кравчинский В.А. (2011).** Фанерозойский внутриплитный магматизм Северной Азии: абсолютные палеогеографические реконструкции Африканской низкоскоростной мантийной провинции // Геотектоника, № 6, с. 3—23.
- Лавренчук А.В., Изох А.Э., Поляков Г.В., Метелкин Д.В., Михальцов Н.Э., Травин А.В. (2004).** Черносопкинский тешенит-сиенитовый комплекс северо-западной части Восточного Саяна - одно из проявлений раннедевонского плюмового магматизма // Геология и геофизика, т. 45, № 6, с. 663—677.
- Левашова Н.М., Голованова И.В., Рудько Д.В., Данукалов К.Н., Рудько С.В., Сальманова Р.Ю., Сергеева Н.Д. (2021).** Период гиперактивности магнитного поля в конце эдиакария: оценка частоты инверсий циклостратиграфическим методом // Физика Земли, № 2, с. 119—129, DOI: 10.31857/S0002333721020022.
- Литасов К.Д., Шацкий А.Ф. (2016).** Состав и строение ядра Земли. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 304 с.
- Малич К.Н., Баданина И.Ю., Белоусова Е.А., Туганова Е.В. (2012).** U-Pb результаты датирования циркона и бадделеита ультрамафит-мафитового интрузива Норильск-1 (Россия) // Геология и геофизика, т. 53, № 2, с. 163—172.
- Метелкин Д.В., Абашев В.В., Верниковский В.А., Михальцов Н.Э. (2021).** Палеомагнитное обоснование стационарности Исландского плюма и его раннемелового проявления в Высокоширотной Арктике // ДАН, т. 501, № 2, с. 139—144, DOI: 10.31857/S2686739721120070.
- Метелкин Д.В., Абашев В.В., Верниковский В.А., Михальцов Н.Э. (2022а).** Палеомагнетизм архипелага Земля Франца-Иосифа: приложение к мезозойской тектонике Баренцевоморской континентальной окраины // Геология и геофизика, т. 63, № 4, с. 410—439. DOI: 10.15372/GiG2021175.
- Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю. (2007).** Неопротерозойский этап эволюции Родинии в свете новых палеомагнитных данных по западной окраине Сибирского кратона // Геология и геофизика, т. 48, № 1, с. 42—59.
- Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю. (2012).** Тектоническая эволюция Сибирского палеоконтинента от неопротерозоя до позднего мезозоя: палеомагнитная запись и реконструкции // Геология и геофизика, т. 53, № 7, с. 883—899.
- Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю., Белоносов И.В. (2005).** Сибирский кратон в структуре суперконтинента Родиния: анализ палеомагнитных данных // ДАН, т. 404, № 3, с. 389—394.

- Метелкин Д.В., Виноградов Е.В., Щербакова В.В., Верниковский В.А., Захаров С.М., Наговицин К.Е. (2022b).** К проблеме палеогеографических реконструкций и структуры геомагнитного поля на границе докембрия–палеозоя на примере новых палеомагнитных данных по Оленекскому поднятию (Сибирский кратон) // ДАН, т. 506, № 2, с. 135—141, DOI: 10.31857/S2686739722600990.
- Метелкин Д.В., Елисеев А.А., Щербакова В.В., Михальцов Н.Э., Жидков Г.В., Абашев В.В. (2024).** Напряженность магнитного поля Земли на рубеже перми-триаса: к вопросу о мезозойском низком диполе // ДАН, т. 519, № 2, с. 21—29, DOI: 10.1134/S1028334X24603687.
- Метелкин Д.В., Лавренчук А.В., Михальцов Н.Э. (2019).** О возможности записи инверсии геомагнитного поля в долеритовых силах Норильского района: результаты математического моделирования // Физика Земли, № 6, с. 24—33, DOI: 10.31857/S0002-33372019624-33.
- Метелкин Д.В., Лузан М.Е., Лавренчук А.В., Василевский А.Н., Елисеев А.А., Брагин В.Ю. (2025).** Свидетельство вклада недипольных источников в геомагнитное поле девона по результатам анализа палеомагнитных направлений в породах Минусинского прогиба (Южная Сибирь) // ДАН, (в печати).
- Михальцов Н.Э., Казанский А.Ю., Рябов В.В., Шевко А.Я., Куприш О.В., Брагин В.Ю. (2012).** Палеомагнетизм траппов северо-западной части Сибирской платформы по результатам исследований керна // Геология и геофизика, т. 53, № 11, с. 1595—1613.
- Михальцов Н.Э., Карякин Ю.В., Абашев В.В., Брагин В.Ю., Верниковский В.А., Травин А.В. (2016).** Геодинамика Баренцево-Карской окраины в мезозое на основе новых палеомагнитных данных для пород архипелага Земля Франца-Иосифа // ДАН, т. 471, № 6, с. 692—696, DOI: 10.7868/S0869565216360172.
- Павлов В.Е., Галле И., Шацилло А.В., Водовозов В.Ю. (2004).** Палеомагнетизм нижнего кембрия долины нижнего течения р. Лена – новые ограничения на кривую кажущейся миграции полюса Сибирской платформы и аномальное поведение геомагнитного поля в начале фанерозоя // Физика Земли, № 2, с. 28—49.
- Павлов В.Е., Пасенко А.М., Шацилло А.В., Паверман В.И., Щербакова В.В., Малышев С.В. (2018).** Систематика палеомагнитных направлений раннего кембрия северных и восточных районов Сибирской платформы и проблема аномального геомагнитного поля вблизи границы протерозоя и фанерозоя // Физика Земли, № 5, с. 122—146, DOI: 10.1134/S0002333718050113.
- Печерский Д.М., Диденко А.Н. (1995).** Палеоазиатский океан: петромагнитная и палеомагнитная информация о его литосфере. Москва, ОИФЗ РАН, 298 с.
- Печерский Д.М., Любушин А.А., Шаронова З.В. (2010).** О синхронности событий в ядре и на поверхности Земли: изменения в органическом мире и полярности геомагнитного поля в фанерозое // Физика Земли, № 7, с. 64—74.
- Сараев С.В., Батурина Т.П., Пономарчук В.А., Травин А.В. (2009).** Пермотриасовые вулканы Колтогорско-Уренгойского рифта Западно-Сибирской геосинеклизы // Геология и геофизика, т. 50, № 1, с. 4—20.
- Соболев А.В., Соболев С.В., Кузьмин Д.В., Малич К.Н., Петрунин А.Г. (2009).** Механизм образования сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами // Геология и геофизика, т. 50, № 12, с. 1293 – 1334.
- Терез Э.И., Герасимов М.Е. (2009).** К вопросу о происхождении Луны и плюм-, плейт- тектонической эволюции геосфер (оболочек) Земли // Геофизический журнал, т. 31, № 6, с. 153—163.
- Хераскова Т.Н., Буш В.А., Диденко А.Н., Самыгин С.Г. (2010).** Распад Родинии и ранние стадии развития Палеоазиатского океана // Геотектоника, № 1, с. 5—28.
- Храмов А.Н. (2007).** Геомагнитные инверсии в палеозое: переходное поле, полярная асимметрия и мантийная конвекция // Физика Земли, № 10, с. 4—14.
- Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С., Родионов В.П., Слауцитайс И.П. (1982).** Палеомагнитология. Ленинград, Недра, 312 с.
- Храмов А.Н., Иосифиди А.Г. (2012).** Асимметрия геомагнитной полярности: экваториальный диполь, пангея и земное ядро // Физика Земли, № 1, с. 30—43.
- Шацилло А.В., Кузнецов Н.Б., Павлов В.Э., Федонкин М.А., Прияткина Н.С., Серов С.Г., Рудько С.В. (2015).** Первые магнитостратиграфические данные о стратотипе лопатинской свиты (северо-

- восток Енисейского кряжа): проблемы ее возраста и палеогеографии Сибирской платформы на рубеже протерозоя и фанерозоя // ДАН, т. 465, № 4, с. 464—468, DOI: 10.7868/S0869565215340228.
- Шацилло А.В., Павлов В.Э. (2019).** Систематика палеомагнитных направлений раннего–среднего девона Минусинских впадин: новые данные и старые проблемы // Физика Земли, № 3, с. 97—116, DOI: 10.31857/S0002-33372019397-116.
- Шацилло А.В., Рудько С.В., Латышева И.В., Рудько Д.В., Федюкин И.В., Паверман В.И., Кузнецов Н.Б. (2020).** Гипотеза «блуждающего экваториального диполя»: к проблеме низкоширотных оледенений и конфигурации геомагнитного поля позднего докембрия // Физика Земли, № 6, с. 113—134, DOI: 10.31857/S0002333720060083.
- Шелепаев Р.А., Егорова В.В., Изох А.Э., Зельтманн Р. (2018).** Коллизионный базитовый магматизм складчатого обрамления юга Сибири (Западный Сангилен, Юго-Восточная Тува) // Геология и геофизика, т. 59, № 5, с. 653-672, DOI:10.15372/GiG20180506
- Шпилов Э.В. (2016).** Базальтоидный магматизм и сдвиговая тектоника Арктической континентальной окраины Евразии в приложении к начальному этапу геодинамической эволюции Амеразийского бассейна // Геология и геофизика, т. 57, № 12, с. 2115—2142, DOI: 10.15372/GiG20161202.
- Шпилов Э.В., Карякин Ю.В. (2011).** Баренцевоморская магматическая провинция: геолого-геофизические свидетельства и новые результаты определения  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  возраста // ДАН, т. 439, № 3, с. 376—382.
- Шпилов Э.В., Карякин Ю.В. (2014).** Дайки острова Хейса (архипелаг Земля Франца-Иосифа): тектоническая позиция и геодинамическая интерпретация // ДАН, т. 457, № 3, с. 327—331, DOI: 10.7868/S0869565214210233.
- Щербакова В.В., Жидков Г.В., Латышев А.В., Щербаков В.П. (2013).** Оценка вариаций палеонапряженности по сибирским траппам Маймеча-Котуйского и Норильского районов // Физика Земли, № 4, с. 43—60, DOI: 10.7868/S0002333713030149.
- Щербакова В.В., Жидков Г.В., Щербаков В.П., Латышев А.В., Фетисова А.М. (2015).** О проверке гипотезы низкого мезозойского поля на трапповых породах Сибири // Физика Земли, № 3, с. 47—67, DOI: 10.7868/S0002333715030151.
- Щербакова В.В., Щербаков В.П., Водовозов В.Ю., Сычева Н.К. (2005).** Палеонапряженность на границе пермь – триас и в поздней перми // Физика Земли, № 11, с. 79—94.
- Ярмолук В.В., Воронцов А.А. (1993).** Девонский вулканизм восточного обрамления Монгольского Алтая и его структурная приуроченность // Геотектоника, № 4, с. 76—86.
- Ярмолук В.В., Коваленко В.И., Кузьмин М.И. (2000).** Северо-Азиатский суперплюм в фанерозое: магматизм и глубинная геодинамика // Геотектоника, № 5, с. 3—29.
- Abrajevitch A., Van der Voo R., 2010.** Incompatible Ediacaran paleomagnetic directions suggest an equatorial geomagnetic dipole hypothesis // Earth Planet. Sci. Lett., v. 293 (1), p. 164–170, DOI: 10.1016/j.epsl.2010.02.038.
- Alken P., Thébaud E., Beggan C.D., Amit H., Aubert J., Baerenzung J., Bondar T.N., Brown W.J., Califf S., Chambodut A., Chulliat A., Cox G.A., Finlay C.C., Fournier A., Gillet N., Grayver A., Hammer M.D., Holschneider M., Huder L., Hulot G., Jager T., Kloss C., Korte M., Kuang W., Kuvshinov A., Langlais B., Léger J.-M., Lesur V., Livermore P.W., Lowes F.J., Macmillan S., Magnes W., Manda M., Marsal S., Matzka J., Metman M.C., Minami T., Morschhauser A., Mound J.E., Nair M., Nakano S., Olsen N., Pavon-Carrasco F.J., Petrov V.G., Ropp G., Rother M., Sabaka T.J., Sanchez S., Saturnino D., Schnepf N.R., Shen X., Stolle C., Tangborn A., Toffner-Clausen L., Toh H., Torta J.M., Varner J., Vervelidou F., Vigneron P., Wardinski I., Wicht J., Woods A., Yang Y., Zeren Z., Zhou B. (2021).** International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // Earth Planets and Space, v. 73 (49), DOI: 10.1186/s40623-020-01288-x.
- Augland L.E., Ryabov V.V., Vernikovskiy V.A., Planke S., Polozov A., Callegaro S., Jerram D.A., Svensen H. (2019).** The main pulse of the Siberian Traps expanded in size and composition // Sci. Rep., v. 9 (1), p. 1–12, DOI: 10.1038/s41598-019-54023-2.

- Bazhenov M.L., Levashova N.M., Meert J.G., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M. (2016).** Late Ediacaran magnetostratigraphy of Baltica: Evidence for magnetic field hyperactivity? // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 435, p. 124–135, DOI: 10.1016/j.epsl.2015.12.015.
- Becker T.W., Boschi I. (2002).** A comparison of tomographic and geodynamic mantle models // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, v. 3, DOI: 10.1029/2001GC000168.
- Biggin A., Steinberger B., Aubert J., Suttie N., Holme R., Torsvik T., Van der Meer D., Van Hinsbergen D. (2012).** Possible links between long-term geomagnetic variations and whole-mantle convection processes // *Nat. Geosci.*, v. 5 (8), p. 526–533, DOI: 10.1038/NCEO1521.
- Biggin A.J., Bono R.K., Meduri D.G., Sprain C.J., Davies C.J., Holme R., Doubrovine P.V. (2020).** Quantitative estimates of average geomagnetic axial dipole dominance in deep geological time // *Nat. Commun.*, v. 11 (1), DOI: 10.1038/s41467-020-19794-7.
- Blanco D., Kravchinsky V.A., Valet J.P., Ali A., Potter D.K. (2012).** Does the Permo-Triassic geomagnetic dipole low exist? // *Phys. Earth Planet. Inter.*, v. 204, p. 11–21. DOI: 10.1016/j.pepi.2012.06.005.
- Bobrovnikova E.M., Lhuillier F., Shcherbakov V.P., Shcherbakova V.V., Zhidkov G.V., Lebedev L.E., Eid B., Pavlov V.E. (2022).** High-Latitude Paleointensities During the Cretaceous Normal Superchron from the Okhotsk–Chukotka Volcanic Belt // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, v. 127, DOI: 10.1029/2021JB023551.
- Bono R.K., Paterson G.A., van der Boon A., Engbers Y.A., Grappone J.M., Handford B., Hawkins L.M.A., Lloyd S.J., Sprain C.J., Thallner D., Biggin A.J. (2022).** The PINT database: a definitive compilation of absolute palaeomagnetic intensity determinations since 4 billion years ago // *Geophys. J. Int.*, v. 229, p. 522–545, DOI: 10.1093/gji/ggab490.
- Bono R.K., Tarduno J.A., Nimmo F., Cottrell R.D. (2019).** Young inner core inferred from Ediacaran ultra-low geomagnetic field intensity // *Nat. Geosci.*, v. 12 (2), p. 143–147, DOI: 10.1038/s41561-018-0288-0.
- Buffett B.A. (2010).** The enigmatic inner core // *Science*, v. 328 (5981), p. 982–983, DOI: 10.1126/science.1190506.
- Burgess S.D., Bowring S.A. (2015).** High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during, and after Earth's most severe extinction // *Sci. Adv.*, v. 1 (7), DOI: 10.1126/sciadv.1500470.
- Burke K., Torsvik T.H. (2004).** Derivation of Large Igneous Provinces of the past 200 million years from longterm heterogeneities in the deep mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 227, p. 531–538, DOI: 10.1016/j.epsl.2004.09.015.
- Chambers L.M., Pringle M.S. (2001).** Age and duration of activity at the Isle of Mull Tertiary igneous Centre, Scotland, and confirmation of the existence of subchrons during Anomaly 26r // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 193 (3–4), p. 333–345, DOI: 10.1016/S0012-821X(01)00499-X.
- Channell J.E.T., Vázquez Riveiros N., Gottschalk J., Waelbroeck C., Skinner L.C. (2017).** Age and duration of Laschamp and Iceland Basin geomagnetic excursions in the South Atlantic Ocean // *Quat. Sci. Rev.*, v. 167, p. 1–13, DOI: 10.1016/j.quascirev.2017.04.020.
- Chayka I.F., Izokh O.P., Rogov V.I., Vinogradov E.V., Vasyukova E.A., Lobastov B.M., Rudnev S.N., Izokh A.E., Grazhdankin D.V. (2025).** Rift-related explosive volcanism on the eve of the Cambrian 'explosion' on the Olenek Uplift (northeastern margin of Siberian Craton) // *J. Asian Earth Sci.*, v. 288, DOI: 10.1016/j.jseaes.2025.106592.
- Corfu F., Polteau S., Planke S., Faleide J.I., Svensen H., Zayoncheck A., Stolbov N. (2013).** U-Pb geochronology of Cretaceous magmatism on Svalbard and Franz Josef Land, Barents Sea Large Igneous Province // *Geol. Mag.*, v. 150 (6), p. 1127–1135, DOI: 10.1017/S0016756813000162.
- Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. (2003).** Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 205, p. 295–308, DOI: 10.1016/S0012-821X(02)01048-8.
- Courtillot V., Olson P. (2007).** Mantle plumes link magnetic superchrons to Phanerozoic mass depletion events // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 260, p. 495–504, DOI: 10.1016/j.epsl.2007.06.003.
- Dalrymple G.B., Czamanske G.K., Fedorenko V.A., Simonov O.N., Lanphere M.A., Likhachev A.P. (1995).** A reconnaissance  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronologic study of ore-bearing and related rocks, Siberian Russia // *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 59 (10), p. 2071–2083, DOI: 10.1016/0016-7037(95)00127-3.
- Davydov V.I., Karasev E.V., Nurgalieva N.G., Schmitz M.D., Budnikov I.V., Biakov A.S., Kuzina D.M., Silantiev V.V., Urazaeva M.N., Zharinova V.V., Zorina S.O., Gareev B., Vasilenko D.V. (2021).**



- Climate and biotic evolution during the Permian-Triassic transition in the temperate Northern Hemisphere, Kuznetsk Basin, Siberia, Russia // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, v. 573, DOI: 10.1016/j.palaeo.2021.110432.
- Deuss A., Irving J.C.E., Woodhouse J.H. (2010).** Regional variation of inner core anisotropy from seismic normal mode observations // *Science*, v. 328 (5981), p. 1018–1020, DOI: 10.1126/science.1188596.
- Di Chiara A., Tauxe L., Staudigel H., Florindo F., Protti M., Yu Y., Wartho J.-A., van den Bogaard P., Hoernle K. (2021).** Earth's magnetic field strength and the Cretaceous Normal Superchron: New data from Costa Rica // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, v. 22 (4), DOI: 10.1029/2020GC009605.
- Dobretsov N.L., Vernikovskiy V.A. (2001).** Mantle plumes and their geological manifestations // *Int. Geol. Rev.*, v. 43, p. 771–787, DOI: 10.1080/00206810109465047.
- Domeier M., Robert B., Meert J.G., Kulakov E.V., McCausland P.J., Trindade R.I., Torsvik T.H. (2023).** The enduring Ediacaran paleomagnetic enigma // *Earth-Sci. Rev.*, v. 242, DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104444.
- Dummann W., Wennrich V., Schroder-Adams C. J., Leicher N., Herrle J. O. (2024).** Ash deposits link Oceanic Anoxic Event 2 to High Arctic volcanism // *Geology*, v. 52, p. 927–932, DOI: 10.1130/G52368.1.
- Ernst R.E. (2014).** Large Igneous Provinces. Cambridge, Cambridge University Press, 653 p., DOI: 10.1017/CBO9781139025300.
- Ferk A., Leonhardt R. (2009).** The Laschamp geomagnetic field excursion recorded in Icelandic lavas // *Phys. Earth Planet. Inter.*, v. 177, p. 19–30, DOI: 10.1016/j.pepi.2009.07.006.
- French S.W., Romanowicz B. (2015).** Broad plumes rooted at the base of the Earth's mantle beneath major hotspots // *Nature*, v. 525, p. 95–99, DOI: 10.1038/nature14876.
- Gaina C., Medvedev S., Torsvik T.H., Koulakov I., Werner S.C. (2014).** 4D Arctic: A glimpse into the structure and evolution of the Arctic in the light of new geophysical maps, plate tectonics and tomographic models // *Surv. Geophys.*, v. 35, p. 1095–1122, DOI: 10.1007/s10712-013-9254-y.
- Glatzmaier G.A., Roberts P.H. (1995).** A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal // *Nature*, v. 377, p. 203–209, DOI: 10.1038/377203a0.
- Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. (2020).** The Geologic Time Scale. Amsterdam, Elsevier, 1390 p., DOI: 10.1127/nos/2020/0634.
- Gurevitch E.L., Westphal M., Daragan-Suchov J., Feinberg H., Pozzi J.P., Khramov A.N. (1995).** Paleomagnetism and magnetostratigraphy of the traps from Western Taimyr (Northern Siberia) and the Permo-Triassic crisis // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 136, p. 461–473, DOI: 10.1016/0012-821X(95)00183-D.
- Hawkins L.M., Grappone J.M., Sprain C.J. et al. (2021).** Intensity of the Earth's magnetic field: Evidence for a Mid-Paleozoic dipole low // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, v. 118 (34), DOI: 10.1073/pnas.2017342118.
- Heunemann C., Krasa D., Soffel H., Gurevitch E., Bachtadse V. (2004).** Directions and intensities of the Earth's magnetic field during a reversal: results from the Permo-Triassic Siberian trap basalts, Russia // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 218, p. 197–213, DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00642-6.
- Hounslow M.W., Domeier M., Biggin A.J. (2018).** Subduction flux modulates the geomagnetic polarity reversal rate // *Tectonophysics*, v. 742–743, p. 34–49, DOI: 10.1016/j.tecto.2018.05.018.
- Hunt G.R., van den Bremer T.S. (2011).** Classical plume theory: 1937–2010 and beyond // *IMA J. Appl. Math.*, v. 76 (3), p. 424–448, DOI: 10.1093/imamat/hxq056.
- Ivanov A.V., He H., Yan L., Ryabov V.V., Shevko A.Y., Paleskii S.V., Nikolaeva I.V. (2013).** Siberian Traps large igneous province: evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism // *Earth-Sci. Rev.*, v. 122, p. 58–76, DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.04.001.
- Jarboe N.A., Coe R.S., Glen J.M.G. (2011).** Evidence from lava flows for complex polarity transitions: the new composite Steens Mountain reversal record // *Geophys. J. Int.*, v. 186, p. 580–602, DOI: 10.1111/j.1365-246X.2011.05086.x.
- Jellinek A.M., Manga M. (2004).** Links between long-lived hot spots, mantle plumes, D", and plate tectonics // *Rev. Geophys.*, v. 42 (3), DOI: 10.1029/2003RG000144.
- Jiang Q., Jourdan F., Olierook H.K.H., Merle R.E. (2023).** An appraisal of the ages of Phanerozoic large igneous provinces // *Earth-Sci. Rev.*, v. 237, 104314, DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104314.

- Kamo S.L., Czamanske G.K., Amelin Yu., Fedorenko V.A., Davis D.W., Trofimov V.R. (2003).** Rapid eruption of Siberian flood-volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian-Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 214, p. 75–91, DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00347-9.
- Kirschvink J.L., Rozanov A.Yu. (1984).** Magnetostratigraphy of lower Cambrian strata from the Siberian Platform: a palaeomagnetic pole and a preliminary polarity time-scale // *Geol. Mag.*, v. 121 (3), p. 189–203, DOI: 10.1017/S0016756800028259.
- Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Cogné J.-P. (2001).** Palaeomagnetic study of Vendian and Early Cambrian rocks of South Siberia and Central Mongolia: was the Siberian platform assembled at this time? // *Precambrian Res.*, v. 110 (1–4), p. 61–92, DOI: 10.1016/S0301-9268(01)00181-4.
- Kristoffersen Y., Nilsen E.H., Hall J.K. (2023).** The High Arctic Large Igneous Province: first seismic stratigraphic evidence for multiple Mesozoic volcanic pulses on the Lomonosov Ridge, central Arctic Ocean // *J. Geol. Soc.*, v. 180 (4), jgs2022-153, DOI: 10.1144/jgs2022-153.
- Kulakov E.V., Sprain C.J., Doubrovine P.V. et al. (2019).** Analysis of an Updated Paleointensity Database (QPI-PINT) for 65–200 Ma: Implications for the Long-Term History of Dipole Moment Through the Mesozoic // *J. Geophys. Res. Solid Earth*, v. 124, p. 9999–10022, DOI: 10.1029/2018JB017287.
- Kutzner C., Christensen U. (2002).** From stable dipolar to reversing numerical dynamos // *Phys. Earth Planet. Inter.*, v. 131, p. 29–45, DOI: 10.1016/S0031-9201(02)00033-9.
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A. (2010).** Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province // *Earth-Sci. Rev.*, v. 102 (1–2), p. 29–59, DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.06.004.
- Larson R.L., Olson P. (1991).** Mantle plumes control magnetic reversal frequency // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 107, p. 437–447, DOI: 10.1016/0012-821X(91)90091-U.
- Latyshev A.V., Fetisova A.M., Veselovskiy R.V. (2020).** Linking Siberian Traps LIP emplacement and end-Permian mass extinction: evidence from magnetic stratigraphy of the Maymecha-Kotuy volcanic section // *Geosciences*, v. 10 (8), 295, DOI: 10.3390/geosciences10080295.
- Lawver L.A., Grantz A., Gahagan L.M. (2002).** Plate kinematic evolution of the present Arctic region since the Ordovician // *Geol. Soc. Am. Bull., Spec. Pap.*, v. 360, p. 333–362, DOI: 10.1130/0-8137-2360-4.333.
- Lawver L.A., Müller R.D. (1994).** Iceland hotspot track // *Geology*, v. 22, p. 311–314, DOI: 10.1130/0091-7613(1994)022<0311:IHT>2.3.CO;2.
- Li Y., et al. (2023).** Revised onset age of magnetochron M0r: Chronostratigraphic and geologic implications // *Geology*, v. 51, p. 565–570, DOI: 10.1130/G50873.1.
- Lind E., Kropotov S., Czamanske G., Gromme S., Fedorenko V. (1994).** Paleomagnetism of the Siberian flood basalts of the Noril'sk area: A constraint on eruption duration // *Int. Geol. Rev.*, v. 36 (12), p. 1139–1150, DOI: 10.1080/00206819409465508.
- Meert J.G. (1999).** A paleomagnetic analysis of Cambrian true polar wander // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 168 (1–2), p. 131–144, DOI: 10.1016/S0012-821X(99)00042-4.
- Merrill R.T., McFadden P.L. (1999).** Geomagnetic polarity transitions // *Rev. Geophys.*, v. 37, p. 201–226, DOI: 10.1029/1998RG900004.
- Monnereau M., Calvet M., Margerin L., Souriau A. (2010).** Lopsided growth of Earth's inner core // *Science*, v. 328 (5981), p. 1014–1017, DOI: 10.1126/science.1186212.
- Morgan W.J., Morgan J.P. (2007).** Plate velocities in the hotspot reference frame // *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, v. 430, p. 65–78, DOI: 10.1130/2007.2430(04).
- Oakey G., Saltus R. (2016).** Geophysical analysis of the Alpha-Mendelev ridge complex: characterization of the High Arctic large Igneous Province // *Tectonophysics*, v. 691, p. 65–84, DOI: 10.1016/j.tecto.2016.08.005.
- Olson P.L., Glatzmaier G.A., Coe R.S. (2011).** Complex polarity reversals in a geodynamo model // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 304, p. 168–179, DOI: 10.1016/j.epsl.2011.01.031.
- Origin of the Earth and Moon. (2000).** Ed. Canup R.M., Pighter K. Univ. Of Arizon Press, 555 p.

- Pavlov V.E., Fluteau F., Latyshev A.V., Fetisova A.M., Elkins-Tanton L.T., Black B.A. et al. (2019).** Geomagnetic secular variations at the Permian-Triassic boundary and pulsed magmatism during eruption of the Siberian Traps // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, v. 20, p. 773–791, DOI: 10.1029/2018GC007950.
- Polteau S., Hendriks B.W.H., Planke S., Ganerød M., Corfu F., Faleide J.I., Midtkandal I., Svensen H.S., Myklebust R. (2016).** The Early Cretaceous Barents Sea Sill Complex: Distribution,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology, and implications for carbon gas formation // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, v. 441, p. 83–95, DOI: 10.1016/j.palaeo.2015.07.007.
- Popov V., Iosifidi A., Khramov A., Tait J., Bachtadse V. (2002).** Paleomagnetism of Upper Vendian sediments from the Winter Coast, White Sea region, Russia: Implications for the paleogeography of Baltica during Neoproterozoic times // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, v. 107 (11), DOI: 10.1029/2001JB001607.
- Prevot M., Derder M.E.M., McWilliams M., Thompson J. (1990).** Intensity of the Earth's magnetic field: Evidence for a Mesozoic dipole low // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 97 (1–2), p. 129–139, DOI: 10.1016/0012-821X(90)90104-6.
- Provatidis C.G. (2024).** On the magnetic field in Earth's interior // *Phys. Scr.*, v. 99, DOI: 10.1088/1402-4896/ad17fc.
- Reichow M.K., Pringle M.S., Al'Mukhamedov A.I., Allen M.B., Andreichev V.L., Buslov M.M., Davies C.E., Fedoseev G.S., Fitton J.G., Inger S., Medvedev A.Ya., Mitchell C., Puchkov V.N., Safonova I.Yu., Scott R.A., Saunders A.D. (2009).** The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: Implications for the end-Permian environmental crisis // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 277, p. 9–20, DOI: 10.1016/j.epsl.2008.09.030.
- Reichow M.K., Saunders A.D., White R.V., Pringle M.S., Al'Mukhamedov A.I., Medvedev A.Ya., Kirda N.P. (2002).**  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dates from the West Siberian Basin: Siberian Flood Basalt Province doubled. // *Science*, v. 296 (5574), p. 1846–1849, DOI: 10.1126/science.1071671.
- Roberts P.H. (2015).** Theory of the geodynamo. Treatise on Geophysics, 2nd ed. Oxford, Elsevier, v. 8, p. 57–90.
- Sarson G.R., Jones C.A. (1999).** A convection driven geodynamo reversal model // *Phys. Earth Planet. Inter.*, v. 111, p. 3–20, DOI: 10.1016/S0031-9201(98)00150-9.
- Seton M., Müller R.D., Zahirovic S., Gaina C., Torsvik T., Shephard G., Talsma A., Gurnis M., Turner M., Maus S., Chandler M. (2012).** Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma // *Earth-Sci. Rev.*, v. 113, p. 212–270, DOI: 10.1016/j.earscirev.2012.03.002.
- Shcherbakova V.V., Bakhmutov V.G., Thallner D., Shcherbakov V.P., Zhidkov G.V., Biggin A.J. (2020).** Ultra-low palaeointensities from East European Craton, Ukraine support a globally anomalous palaeomagnetic field in the Ediacaran // *Geophys. J. Int.*, v. 220 (3), p. 1928–1946, DOI: 10.1093/gji/ggz566.
- Shcherbakova V.V., Biggin A.J., Veselovskiy R.V. et al. (2017).** Was the Devonian geomagnetic field dipolar or multipolar? Palaeointensity studies of Devonian igneous rocks from the Minusa Basin (Siberia) and the Kola Peninsula dykes, Russia // *Geophys. J. Int.*, v. 209 (2), p. 1265–1286, DOI: 10.1093/gji/ggx085.
- Sobolev S.V., Sobolev A.V., Kuzmin D.V., Krivolutsкая N.A., Petrunin A.G., Arndt N. T., Radko V.A., Vasiliev Y.R. (2011).** Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes // *Nature*, 477 (7364), 312–316. DOI: 10.1038/nature10385
- Steinberger B. (2000).** Plumes in a convecting mantle: models and observations for individual hotspots // *J. Geophys. Res.*, v. 105 (B5), p. 11127–11152, DOI: 10.1029/1999JB900398.
- Steinberger B., Torsvik T.H. (2008).** Absolute plate motions and true polar wander in the absence of hotspot tracks // *Nature*, v. 452, p. 620–623, DOI: 10.1038/nature06824.
- Storey M., Pedersen A.K., Stecher O., Bernstein S., Larsen H.C., Larsen L.M., Baker J.A., Duncan R.A. (2004).** Long-lived postbreakup magmatism along the East Greenland margin: evidence for shallow-mantle metasomatism by the Iceland plume // *Geology*, v. 32 (2), p. 173–176, DOI: 10.1130/G19937.1.
- Tauxe L., Yamazaki T. (2007).** Paleointensities. Amsterdam, Elsevier, v. 5, p. 509–563, DOI: 10.1016/B978-044452748-6.00098-5.
- Torsvik T.H., Müller R.D., Van der Voo R. et al. (2008).** Global Plate Motion Frames: Toward a Unified Model // *Rev. Geophys.*, v. 46 (3), DOI: 10.1029/2007RG000227.

- Torsvik T.H., Van der Voo R., Doubrovine P.V. et al. (2014).** Deep mantle structure as a reference frame for movements in and on the Earth // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, v. 111 (24), p. 8735–8740, DOI: 10.1073/pnas.1318135111.
- Valet J.-P., Fournier A., Courtillot V., Herrero-Bervera E. (2012).** Dynamical similarity of geomagnetic field reversals // *Nature*, v. 490, p. 89–93, DOI: 10.1038/nature11491.
- Van der Boon A., Biggin A.J., Thallner D. et al. (2022).** A persistent non-uniformitarian paleomagnetic field in the Devonian? // *Earth-Sci. Rev.*, v. 231, 104073, DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.104073.
- Vernikovsky V.A., Pease V.L., Vernikovskaya A.E., Romanov A.P., Gee D.G., Travin A.V. (2003).** First report of early Triassic A-type granite and syenite intrusions from Taimyr: product of the northern Eurasian superplume? // *Lithos*, v. 66 (1–2), p. 23–36, DOI: 10.1016/S0024-4937(02)00192-5.
- Vernikovsky V.A., Shemin G.G., Deev E.V., Metelkin D.V., Matushkin N.Y., Pervukhina N.V. (2018).** Geodynamics and Oil and Gas Potential of the Yenisei-Khatanga basin (Polar Siberia) // *Minerals*, v. 8 (11), DOI: 10.3390/min8110510.
- Walker J.D., Geissman J.W., Bowring S.A., Babcock L.E. (2013).** The Geological Society of America Geologic Time Scale // *GSA Bull.*, v. 125 (3–4), p. 259–272, DOI: 10.1130/B30712.1.
- Wang S., Yu H., Zhang Q., Zhao Y. (2018).** Absolute plate motions relative to deep mantle plumes // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 490, p. 88–99, DOI: 10.1016/j.epsl.2018.03.021.
- Westphal M., Gurevitch E.L., Samsonov B.V., Feinberg H., Pozzi J.P. (1998).** Magnetostratigraphy of the lower Triassic volcanics from deep drill SG6 in western Siberia: evidence for long-lasting Permo-Triassic volcanic activity // *Geophys. J. Int.*, v. 134, p. 254–266, DOI: 10.1046/j.1365-246X.1998.00557.x.
- Zhang Y., et al. (2021).** Magnetostratigraphy of U-Pb-dated boreholes in Svalbard, Norway, implies that magnetochron M0r (a proposed Barremian-Aptian boundary marker) begins at  $121.2 \pm 0.4$  Ma // *Geology*, v. 49, p. 733–737, DOI: 10.1130/G48591.1.
- Zhao D. (2001).** Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes // *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 192, p. 251–265, DOI: 10.1016/S0012-821X(01)00465-4.