

УДК 550.838.5

ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ФАНЕРОЗОЕ–ВЕНДЕ И НИЖНЕМАНТИЙНЫЕ ПЛЮМЫ

© 2011 г. Д.М. Печерский, З.В. Шаронова

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Обобщены данные о поведении амплитуды вариаций направления геомагнитного поля (S) и частоты инверсий в фанерозое–венде и рассмотрена взаимосвязь между ними и нижнемантийными плюмами. Часто максимальные значения S отмечаются не в эпицентре плюма, а оказываются смещенными от него. Так, в случае кайнозойских плюмов это смещение составляет примерно 2000 км, что свидетельствует о сложном (наклонном) подъеме плюмов. При этом прослеживается тенденция смещения выходов плюмов на поверхность к западу–северо-западу от места их образования.

Время образования плюмов и время их выхода на поверхность Земли относятся к временным интервалам с разной частотой геомагнитных инверсий. Следовательно, между образованием плюмов и частотой инверсий связи нет, т.е. эти явления обусловлены разными протекающими в ядре процессами. Поскольку рост S и возникновение плюмов связаны с границей ядро–мантия, то возникновение инверсий, возможно, приурочено к границе внутреннего ядра.

Ключевые слова: палеомагнитные данные, мировые магнитные аномалии, вариации направления геомагнитного поля, инверсии, плюмы, фанерозой.

Введение

В течение последних примерно десяти лет нами рассматривались некоторые характеристики геомагнитного поля и изучалась их связь с нижнемантийными плюмами. Эти исследования начались с анализа амплитуд вариаций направления поля (S), его палеонапряженности, частоты смены полярности в кайнозое и установления их связи с положением центров мировых магнитных аномалий (ММА) и горячих точек [Печерский, 2001]. По современным представлениям, горячие точки – это участки активного внутриплитного вулканизма, являющиеся эпицентрами плюмов, мантийных потоков тепловой энергии и разогретого вещества, восходящих к поверхности Земли с разных глубин. По мнению ряда исследователей (см. [Жарков, Карпов, Леонтьев, 1984; Loper, 1991; Stacey, 1992; Грачев, 2000] и др.), это происходит в результате эпизодической нестабильности слоя D'' (слой от астеносферы до границы ядро–мантия).

Принято считать, что ММА отражают неоднородности на границе ядро–мантия. Если эти неоднородности являются областями зарождения плюмов, то движения под ними в жидком ядре могут быть искажены, что, в свою очередь, должно отразиться на поведении вековых вариаций геомагнитного поля. Отличие вариаций магнитного поля в районе ММА от вариаций, наблюдаемых в других районах, может рассматриваться как подтверждение связи ММА и вековых вариаций с процессами в ядре и на его границе с мантией. Если так, то возможна связь всех трех исследуемых объектов – ММА, вековых вариаций и плюмов.

Авторами данной статьи, в первую очередь, была рассмотрена возможная зависимость амплитуды вариаций направления геомагнитного поля от расстояния до центров ММА. В результате был обнаружен рост амплитуды вариаций по мере приближения к центрам ММА, наблюдаемый в течение лишь 10–20 тыс. лет, что говорит об ограниченном времени существования ММА, а, следовательно, и неоднородностей в ядре, вызы-

вающих эти аномалии. Во-вторых, исследовалась возможная зависимость амплитуды вариаций направления геомагнитного поля от расстояния до эпицентров нижнемантийных плюмов. Для такого сопоставления были выбраны плюмы, формирование которых по имеющимся данным относится, вероятнее всего, к самым низам мантии (см. [Грачев, 2000; Courtillot, Besse, 2003; Ernst, Buchan, 2002, 2003] и др.). Зависимость S от положения точки наблюдения относительно эпицентров современных плюмов прослеживается лишь в палеомагнитных записях направлений геомагнитного поля 30–50 млн. лет тому назад, что объясняется временем подъема плюмов от границы ядро–мантия к поверхности Земли.

Подобный анализ был выполнен для временных интервалов, включающих границы мезозоя–кайнозоя [Pechersky, Garbuzenko, 2005], палеозоя–мезозоя [Печерский, 2007] и протерозоя–палеозоя [Печерский, 2009]. Была отмечена связь между изменениями палеонапряженности и плюмообразованием при отсутствии таковой для частоты инверсий [Печерский, 2007, 2009].

Настоящая статья посвящена обобщению полученных данных; в ней рассматривается связь процессов образования плюмов с поведением двух характеристик геомагнитного поля, обеспеченных достаточной для анализа фактической информацией, – речь идет о вариациях направления геомагнитного поля и его инверсии.

Вариации направления геомагнитного поля

Методика исследований. Естественно, лучше всего изучать вариации геомагнитного поля по их записям в наиболее полных (в идеале, непрерывных) разрезах вулканогенно-осадочных толщ. Но таких данных очень мало, к тому же по отношению к ММА и эпицентрам плюмов они распределены неравномерно. Однако существуют многочисленные определения средних палеомагнитных направлений по конкретным объектам, при вычислении которых обязательно устанавливается кучность (K) – характеристика степени разброса единичных направлений по отношению к среднему палеомагнитному направлению. С использованием K определяется угловое стандартное отклонение $S=81/K^{1/2}$, являющееся суммарной амплитудой вековых вариаций направления геомагнитного поля [Палеомагнитология, 1982].

В отличие от таких характеристик геомагнитного поля, как палеонапряженность и инверсии, обширные сведения о кучности палеомагнитных направлений, т.е. об амплитуде вариаций направления поля во времени и в пространстве, позволяют анализировать не только глобальное поведение этой характеристики, но и ее местные особенности. При этом не нужны записи вековых вариаций в геологической последовательности.

Для анализа поведения S использована регулярно пополняемая база мировых палеомагнитных данных *GPMDDB (Global Paleomagnetic Data Base)*, из которой выбраны наиболее надежные определения. Учитывая, что точный возраст ММА не известен, для их изучения выбирались породы с возрастом от современности до начала хрона Брунес (~0.78 млн. лет); эти данные разделялись по возрасту на три группы: 0–10 тыс. лет, 10–100 тыс. лет и 0.1–0.78 *Ma*.

Была проанализирована связь S с четырьмя ММА: Азиатской (45° с.ш., 105° в.д.), Североамериканской (35° с.ш., 90° з.д.) и двумя Антарктическими (55° ю.ш., 30° з.д. и 55° ю.ш., 45° в.д.). Для анализа связи S с плюмами были выбраны периоды до начала их активной магматической деятельности, во время нее и после. Во временном отношении это интервалы, близкие к современности, к границам мезозоя–кайнозоя, палеозоя–мезозоя и протерозоя–палеозоя. Данные о географическом положении и возрасте выбранных для анализа плюмов приведены в табл. 1, составленной по данным из [Грачев, 2000; Courtillot et al., 2003; Ernst, Buchan, 2003; Gradstein et al., 2004].

Таблица 1. Географическое положение эпицентров использованных для анализа плюмов и возраст их активной магматической деятельности на поверхности Земли (млн. лет тому назад, *Ma*)

Название плюма, регион	Географические координаты эпицентров		Возраст, <i>Ma</i>	Примечание
	Долгота	Широта		
Афар, Восточная Африка	42° в.д.	10° с.ш.	0–1	современные географические координаты
Хамар-Дабана, Прибайкалье	105° в.д.	50° с.ш.	0–25	
Большой Анной, Чукотка	170° в.д.	67° с.ш.	0–1	
Буве, Южная Атлантика	1° в.д.	56° ю.ш.	0–1	
Гавайские острова, Тихий океан	157° з.д.	20° с.ш.	0–50	
Исландия	18° з.д.	68° с.ш.	0–28	
Реюньон, юг Индийского океана	56° в.д.	21° ю.ш.	0–1	
Самоа, юг Тихого океана	171° з.д.	14° ю.ш.	0–1	
Гренландский плюм, базальты Североатлантической провинции (близко современному положению Исландии)	30° з.д.	60° с.ш.	~55	в палеотектонической реконструкции 55 <i>Ma</i>
Деканские траппы, юг Индийского океана (близко к современному положению о. Реюньон)	50° в.д.	20° ю.ш.	65	в палеотектонической реконструкции 65 <i>Ma</i>
Раджмахал, юг Индийского океана (современное положение о. Кергелен)	69° в.д.	49° ю.ш.	118	современные географические координаты
Сибирские траппы, Азия	30° в.д.	57° с.ш.	250	в палеотектонической реконструкции 250 <i>Ma</i>
Антрим, Австралия	130° в.д.	15° ю.ш.	509	современные географические координаты
Уичита, Северная Америка	98° з.д.	34° с.ш.	530	
Япетус, Северная Америка	78° з.д.	40° с.ш.	550	
Оуарзазате, Восточная Африка	7° з.д.	30° с.ш.	560	

В базе данных *GPMDV* приводятся возрастные интервалы для каждого определения; нами были вычислены и использованы при анализе средние значения возраста. Нередко для палеомагнитных определений в базе приводится большой возрастной интервал. В таких случаях отнесение определения к одной из возрастных групп уточнялось по палеошироте точки наблюдений на реконструированной карте соответствующего возраста. Естественно, в большинстве случаев палеоширота точки палеомагнитного определения на карте и вычисленная по палеомагнитному наклонению оказывались близкими, однако отмечены случаи заметного завышения или занижения палеошироты. В таких случаях предпочтение отдавалось палеоширотам, определенным по карте.

По степени надежности определений все палеомагнитные данные из базы *GPMDV* были разделены на четыре группы.

1. *Определения, исключенные из анализа*: число образцов не более 10; термочистка (*T*-чистка) не превышает 200°C или отсутствует; чистка переменным полем (*H*-чистка) не более 15 мТл или отсутствует; кучность $K < 7$; угол доверия $\alpha_{95} > 25^\circ$; координаты палеополюса существенно отличаются от координат среднего полюса близкого возраста для плиты, к которой относится данное определение. Исключены результаты современного и близкого к нему перемагничивания более древних пород, так как продолжительность перемагничивания не известна и возможно как существенное сглаживание вековых вариаций или очень быстрое перемагничивание, не захватывающее вариаций, так и неполное перемагничивание. В первых двух случаях амплитуда вариаций, скорее всего, занижена, в последнем – завышена.

2. Низкая надежность определений: число образцов не более 20; T -чистка до 400 °С; H -чистка до 30 мТл.

3. Средняя надежность определений: число образцов более 20; T -чистка не ниже 500°С; H -чистка не менее 50 мТл; наличие положительных геофизических тестов складок, галек, обжига, обращения.

4. Высокая надежность определений: число образцов более 20; обязательная полная T - и H -чистка с компонентным анализом, выделением характеристической компоненты NRM ; наличие сведений об ориентационной (в случае осадочных пород) или о термоостаточной (в случае магматических пород) природе выделенных компонент естественной остаточной намагниченности NRM ; наличие положительных геофизических тестов складок, галек, обжига, обращения.

Поскольку собственно компонентный анализ позволяет надежно выделить компоненты NRM , но не дает сведений об их природе, то очевидна важность полевых геофизических тестов, особенно теста обжига и галек. В базе *GPMDV* такие сведения прямо или косвенно приводятся, позволяя на их основании определить степень надежности данного палеомагнитного определения. Следует подчеркнуть, что все геофизические (полевые) тесты палеомагнитной надежности, важные для доказательства выделения первичной компоненты NRM , не могут служить показателем соответствия величины S суммарной амплитуде вариаций направления геомагнитного поля.

Определения S довольно равномерно распределены по возрасту, но количество имеющихся высоконадежных данных явно недостаточно для статистики (табл. 2). Важно, что для разных по надежности групп определений картина распределения S на гистограммах принципиально не отличается от картины распределения средних значений S по возрастным интервалам и интервалам расстояния до эпицентров плюмов [Печерский, 2001, 2007, 2009; Pechersky, Garbuzenko, 2005]. В связи с этим при своем анализе мы использовали результаты не только высокой надежности.

Таблица 2. Распределение S по возрасту и надежности определений

Возрастной интервал, <i>Ma</i>	Определения S_p	
	всего	в том числе высоконадежных
15–25	117	7
25–35	94	6
35–45	97	6
45–55	108	9
55–65	100	6
70–80	203	27
80–95	265	17
95–110	177	40
120–140	155	31
200–240	102	18
245–265	162	27
270–285	113	13
290–310	136	16
315–340	57	4
500–520	27	12
520–540	64	18
540–560	36	14
560–580	26	9
580–600	17	6

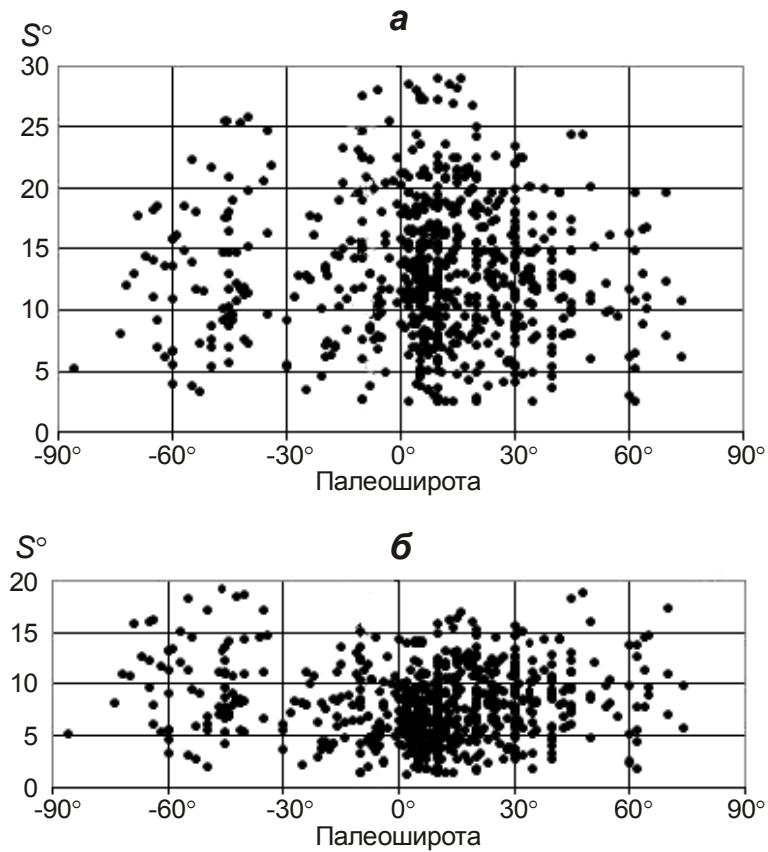


Рис. 1. Зависимость амплитуды вариаций направления геомагнитного поля S от палеошироты, соответствующей точке палеомагнитного наблюдения, до приведения к одной широте (а) и после введения широтной поправки (б). Возрастной интервал 200–340 *Ma*

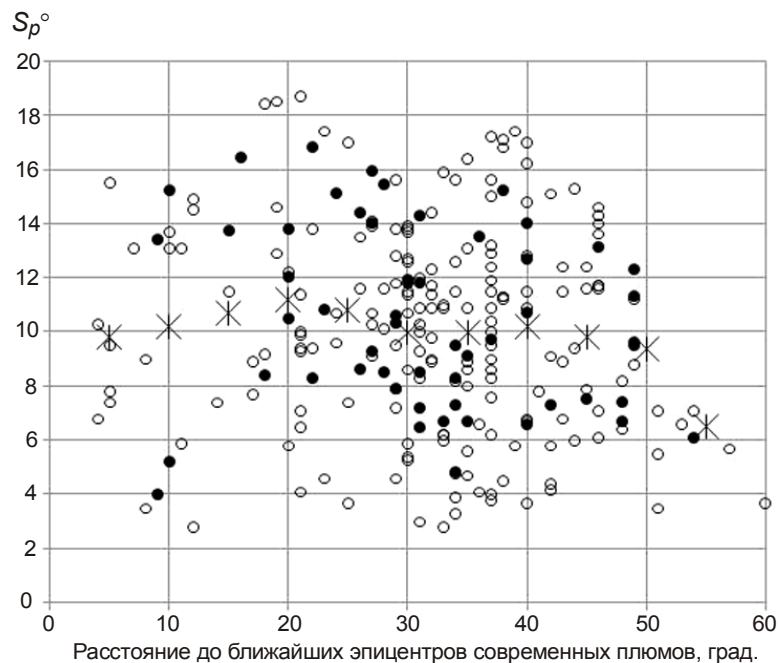


Рис. 2. Распределение единичных значений S_p в зависимости от расстояния до ближайших эпицентров современных плюмов (в градусах большого круга) для возрастного интервала 30–50 *Ma*. Залитые кружки – наиболее надежные определения; кружки без заливки – остальные определения; звездочки – средние для десятиградусных интервалов значения S_p (шаг осреднения – 5°)

По типу пород данные об S разбиты на три группы – осадочные, вулканиды, интрузивы. Для каждого определения S измерено расстояние по дуге большого круга до ближайших центра ММА и эпицентра плюма. Известно, что существует зависимость S от широты: от экватора к полюсу S плавно уменьшается примерно вдвое, что соблюдается для интервалов устойчивого состояния геомагнитного поля всего неогена [Печерский, 1996]. Исследуемые плюмы, как и точки наблюдений, находятся на самых разных широтах, и естественно, что широтная зависимость S будет затушевывать другие закономерности. Для исключения влияния этой зависимости все определения S приводились к единой палеошироте, в качестве которой была выбрана широта полюса; амплитуда вариации с введенной широтной поправкой названа S_p . (С таким же успехом можно было привести данные по S к любой другой широте, например, к широте экватора, как это принято для напряженности геомагнитного поля.)

Широтную зависимость S для возрастного интервала 200–340 Ma наглядно демонстрирует график, приведенный на рис. 1, а; на рис. 1, б представлены те же данные после введения поправки.

Распределение единичных значений S_p в зависимости от расстояния до ближайших эпицентров плюмов представлено на рис. 2.

Обращает на себя внимание большой разброс величин S_p , который, во-первых, может быть следствием неполной и некачественной T - и H -чистки, ошибок измерений и т.п. Во-вторых, этот разброс может быть связан с большим интервалом оценки возраста объекта исследований, приводимого в базе данных *GPMDB*; в-третьих, объясняться разным происхождением первичной остаточной намагниченности (возможно практически мгновенное приобретение термоостаточной намагниченности в эндоконтактах лав; затянутое процессами окисления титаномагнетитов; растянутое приобретение осадками ориентационной остаточной намагниченности, включая диагенез; длительное приобретение термоостаточной намагниченности при остывании интрузивных тел).

Подчеркнем, что расстояние от эпицентра плюма до места его образования на границе ядро–мантия составляет около 3000 км, а канал подъема плюма может быть наклонен. Кроме того, заметно нарушать распределение S_p относительно эпицентров выбранных плюмов может и наличие других плюмов разного возраста, активно действовавших в рассматриваемое время. Перечисленные факторы увеличивают разброс единичных значений S_p , в связи с чем лишь средние значения и моды представляются более объективными количественными характеристиками.

Для раннего кайнозоя, мезозоя и палеозоя использовались карты геодинамических реконструкций, построенные по программе *ODSN Plate tectonic reconstruction service* [Barrera, Johnson, 1999] и заимствованные из [McElhinny, McFadden, 2000; Smethurst, Khramov, Torsvik., 1998; Torsvik, Van der Voo, 2000]. Из-за отсутствия надежных палеотектонических реконструкций для кембрия–венда положение точек палеомагнитных наблюдений относительно эпицентра ближайшего плюма рассматривалось только в пределах континента, на котором находится один из выбранных плюмов – это Австралия, Африка и Северная Америка.

Результаты анализа поведения S_p . Если рассматривать поведение S в зависимости от расстояния до центров ММА, то с удалением от них в интервале 0–10 тыс. лет прослеживается тенденция спада S (рис. 3). Следовательно, можно говорить о наличии связи (или общности) источников ММА с амплитудой вариаций направления геомагнитного поля [Печерский, 2000а,б, 2001].



Рис. 3. Зависимость S от расстояния до центров MMA. Возраст 0–10 тыс. лет. Звездочки – средние для десятиградусных интервалов расстояния значения S

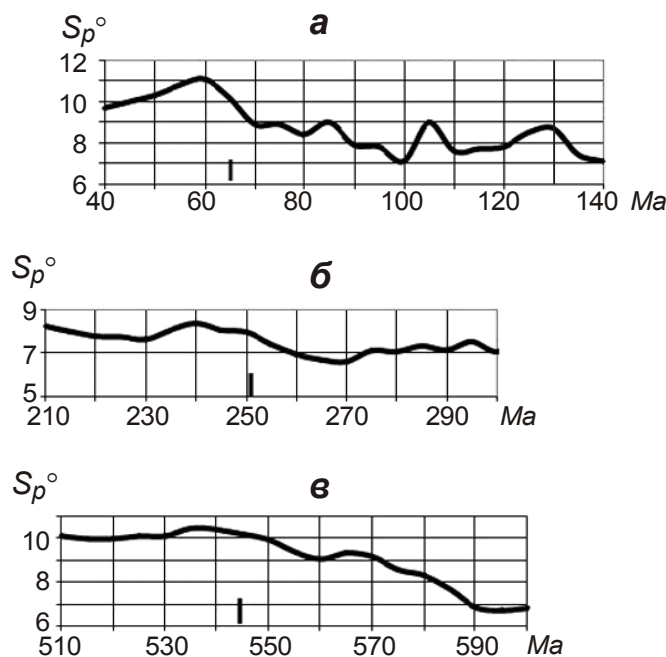


Рис. 4. Поведение средней амплитуды вариаций направления “нормального” геомагнитного поля S_p для временных интервалов, включающих границы мезозоя–кайнозоя (а), палеозоя–мезозоя (б) и протерозоя–палеозоя (в). Черные вертикальные линии на осях абсцисс – границы геологических эр

Для пород, более древних, чем хрон Брюнеса, по отобранным палеомагнитным определениям вычислены средневзвешенные значения S_p по интервалам 10 млн. лет, сглаженные затем с окном 20 млн. лет. Полученная картина представляет поведение средней амплитуды вариаций направления “нормального” геомагнитного поля (рис. 4).

Для рассмотренных интервалов фанерозоя–венда характерно наличие двух основных мод в распределении S_p (рис. 5). Такая бимодальность может быть связана с глобальной и местной причинами. Глобальная состоит в том, что первая (меньшая) мода S_p существует все время и не зависит от расстояния до эпицентров плюмов; она характеризует состояние “нормального” поля (см. рис. 4). Местная причина заключается в том, что вторая (большая) мода S_p существует только на относительно небольших расстояниях от эпицентров плюмов и исчезает с удалением от них, что не столь очевидно из-за разброса определений. Более четко она проступает в средних значениях S_p , вычисленных для десятиградусных интервалов расстояний (рис. 6).

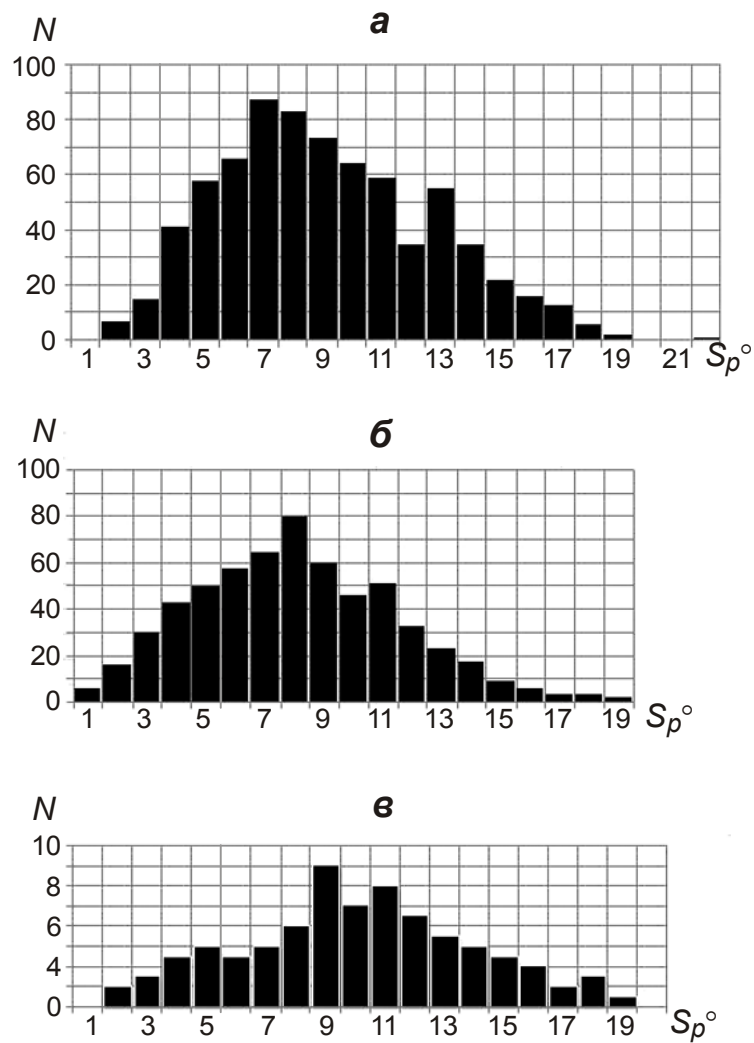


Рис. 5. Гистограммы распределения амплитуд вариаций направления геомагнитного поля S_p для разных временных интервалов: 140–50 Ma (а), 300–200 Ma (б), 600–500 Ma (в)

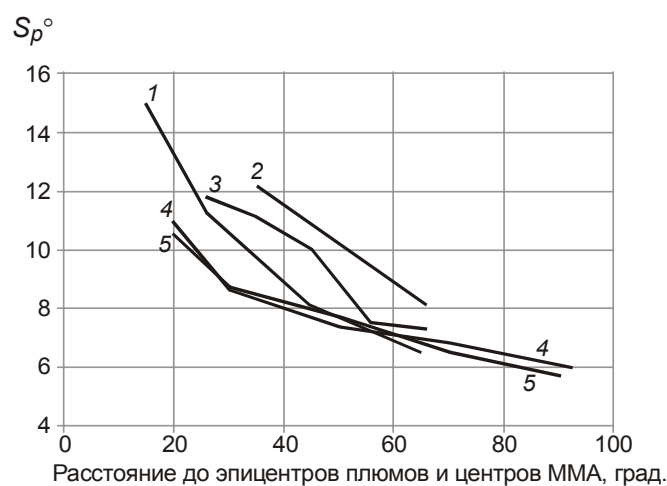


Рис. 6. Зависимость средних амплитуд вариаций направления геомагнитного поля S_p от расстояния до центров ММА и эпицентров плюмов: 1 – до ММА [Печерский, 2001]; 2 – до эпицентра Гренландского плюма (73–82 Ma) [Pechersky, Garbuzenko, 2005]; 3 – до эпицентра Деканского плюма (95–110 Ma) [Pechersky, Garbuzenko, 2005]; 4, 5 – до эпицентра Сибирского плюма (270–285 и 290–300 Ma) [Печерский, 2007]. Интервал осреднения 10–20°

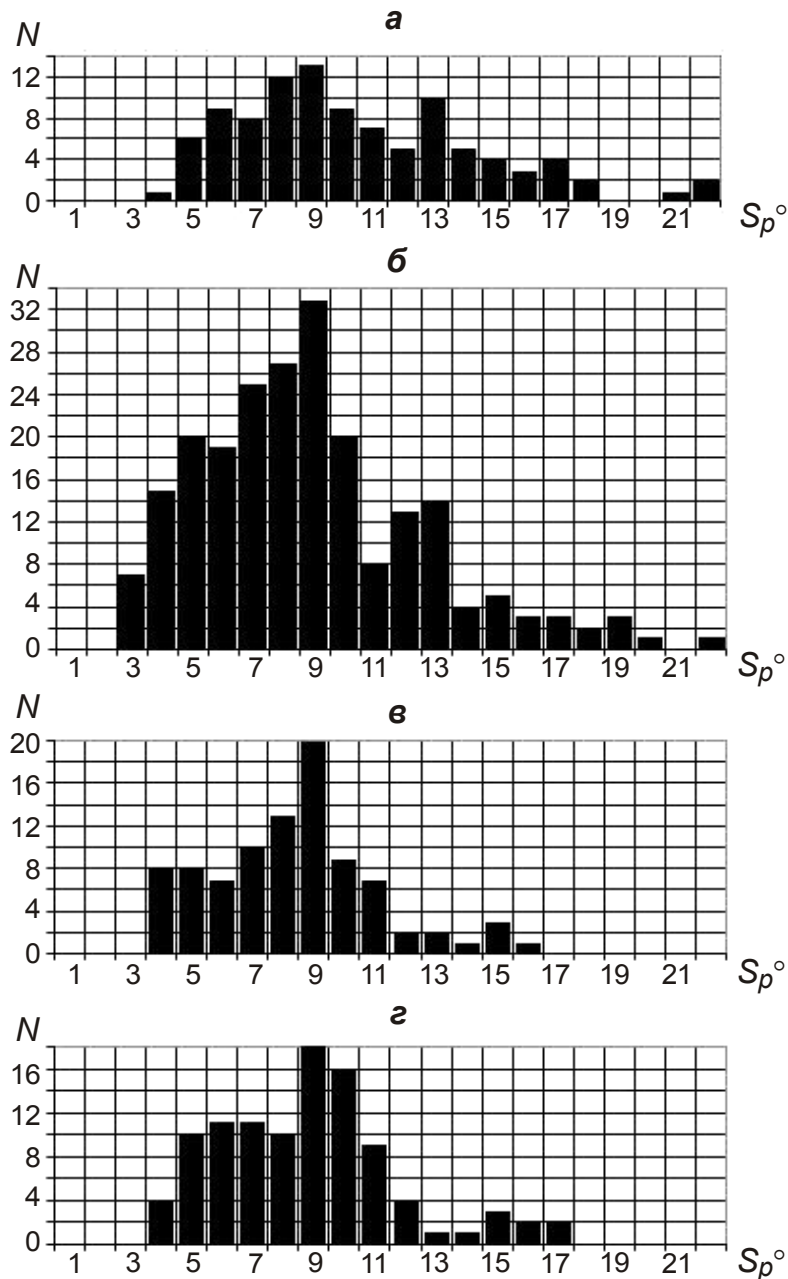


Рис. 7. Гистограммы распределения S_p для различных групп пород, возраст 75–140 Ма: а – вулканиты, б – осадки, в – интрузивы, г – вулканиты и осадки, удаленные от эпицентров плюмов на расстояние более 60°

Отмечается “уменьшение” второй моды в последовательности вулканиты–осадки–интрузивы, что, очевидно, связано с длительностью приобретения естественной остаточной намагниченности (рис. 7).

Отметим, что вторая мода максимальна у вулканитов (рис. 7, а), для которых приобретение остаточной намагниченности происходит практически мгновенно; в осадках (рис. 7, б), приобретение намагниченности которыми более растянуто во времени, эта мода частично “смазывается”. Наконец, в интрузивах (рис. 7, в) вторая мода исчезает совсем, как и для всех пород при расстояниях от эпицентров плюмов более 60° (рис. 7, г). Это свидетельствует в пользу того, что время существования вариаций направления геомагнитного поля с повышенной амплитудой относительно коротко и, вероятно, относится к кратким интервалам неспокойного состояния поля, вызванного

местными возмущениями на границе ядро–мантия. С этим согласуется, например, кратковременность основной вспышки активности Деканских и Сибирских траппов.

Как было отмечено выше, при приближении к центрам современных ММА наблюдается та же картина роста S_p , что и в случае плюмов (см. рис. 3) [Печерский, 2000а,б, 2001]. Из связи S_p и с ММА, и с активностью плюмов следует связь источников ММА и плюмообразования при кратковременности существования тех и других. С другой стороны, активная деятельность Гренландского, Реюньонского, Гавайского и ряда других плюмов охватывает примерно 100 млн. лет [Courtillot et al., 2003; Ernst, Buchan, 2002, 2003]. Столь длительное их существование можно объяснить тем, что возмущение на границе ядро–мантия, приводящее к росту S_p и образованию плюма, в дальнейшем быстро затухает в ядре, но “очаг” в основании мантии может существовать сотни миллионов лет подобно тому, как существуют в земной коре крупные магматические камеры на протяжении многих миллионов лет.

“Отставание” магматизма на поверхности Земли от возбужденного состояния ядра, вызвавшего повышение амплитуды вариаций направления геомагнитного поля и плюмообразование, составляет, по нашим оценкам, 20–50 млн. лет [Печерский, 2007, 2009; Pechersky, Garbuzenko, 2005] и, очевидно, определяет время подъема плюма от границы ядро–мантия до поверхности Земли. При рассмотрении временного интервала от 50 Ma до кайнозоя и “выше” наблюдается следующая картина. Между 50 и 25 Ma существует зависимость S_p от расстояния до эпицентров плюмов; наиболее заметно она выражена в интервале 50–45 Ma и исчезает после 25 Ma [Печерский, 2007]. На основании этого можно предположить, что плюмы, с которыми связаны ныне действующие горячие точки, возникли, главным образом, 45–50 млн. лет назад и несколько позже. Это согласуется с независимыми оценками времени подъема плюмов от слоя D'' , времени передачи энергии, приводящей к движению плит и т.п. [Печерский, 1997; Courtillot, Besse, 1987; Courtillot et al, 2003; Richards, Duncan, Courtillot, 1989]. Подобное “отставание” характерно и для более древних плюмов, т.е. интервал подъема плюмов не зависит от возраста последних (рис. 8), следовательно, условия подъема плюмов, а значит и состояние мантии в течение фанерозоя заметно не менялись.

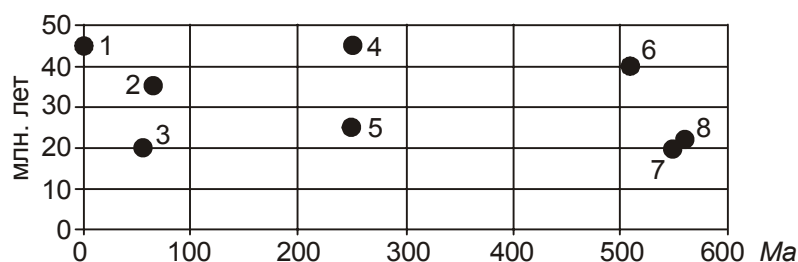


Рис. 8. “Отставание” плюмового магматизма на поверхности Земли от времени возникновения плюма, оцененное по поведению S_p [Печерский, 2001, 2007, 2009; Pechersky, Garbuzenko, 2005]. По оси абсцисс – возраст плюмовой магматической активности на поверхности Земли, Ma; по оси ординат – среднее время подъема плюма от границы ядро–мантия, млн. лет. 1 – современные плюмы, 2 – Деканский трапп, 3 – Исландия, 4, 5 – Сибирские траппы, 6 – Антрим, 7 – Япетус, 8 – Оурзазате

Столь растянутый интервал “отставания” (20–50 млн. лет) можно объяснить двумя альтернативными причинами. Первая из них тривиальная: отставание – результат неопределенности в оценке возраста пород и палеомагнитных определений; среднее время “отставания” составляет 35 млн. лет. Вторая причина нетривиальная: можно допустить, что такие крупные образования как Деканский и Сибирский траппы, Североатлантическая вулканическая провинция стали результатом неоднократных “вспышек”

активности в ядре, приведших к образованию Сибирского, Деканского и других плюмов [Ernst, Buchan, 2003].

Существует теоретическое обоснование времени подъема плюма, согласно которому это время составляет 0.5–3 млн. лет [Добрецов, Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2001]. Это означает, что плюм перемещался в 10–40 раз быстрее, чем по нашим оценкам. В таком случае по мере приближения к эпицентру плюма должен был бы отмечаться рост S_p , практически синхронный времени выхода плюма на поверхность Земли, чего мы не наблюдаем ни для современных, ни для более древних плюмов.

Попробуем сопоставить между собой центры современных ММА, эпицентры ряда современных, палеогеновых и позднепалеозойских плюмов и места их зарождения. Последние мы оцениваем по областям повышенных значений S_p (рис. 9, 10). Проследить распределение по поверхности Земли повышенных значений S_p оказалось возможным только для триас–каменноугольного интервала, времени, когда существовал суперконтинент Пангея, на территории которого довольно равномерно рассеяны точки палеомагнитных наблюдений. К сожалению, провести подобный анализ для более раннего и более позднего интервалов фанерозоя не удалось, так как основная масса мел–палеогеновых пород неравномерно распределена по Альпийскому и Тихоокеанскому поясам, а для раннего палеозоя–венда не оказалось надежных палеотектонических реконструкций. Области значений $S_p \geq 9^\circ$ показаны на рис. 10 в палеорекострукциях соответствующего времени на фоне примерных контуров Пангеи для возраста 250 Ma [Torsvik, Van der Voo, 2000]; здесь же черной заливкой выделена область распространения Сибирских траппов для 250 Ma.

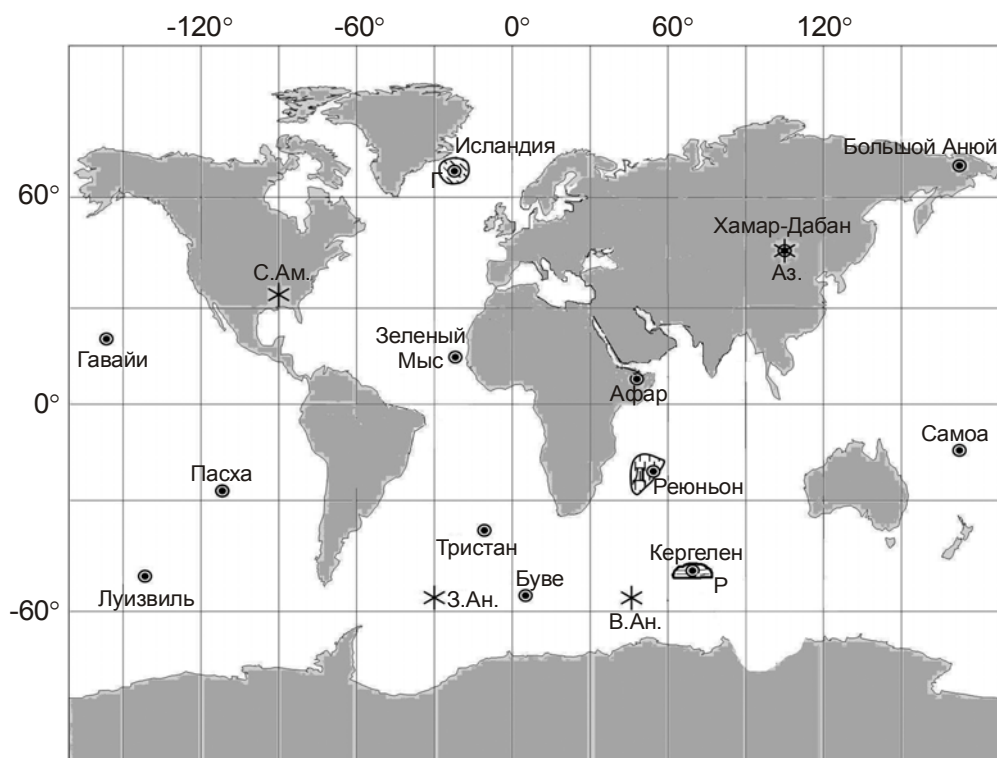


Рис. 9. Схема расположения современных мировых магнитных аномалий (звездочки), выходов на поверхность современных плюмов (двойные кружки) и областей развития траппов (заштрихованные контуры). Современные ММА: С.Ам. – Северо-Американская; Аз. – Азиатская; З.Ан. – Западно-Антарктическая; В.Ан. – Восточно-Антарктическая. Названия современных плюмов приведено рядом с кружками. Области развития современных траппов: Г – Гренландские (в реконструкции 55 Ma); Д – Деканские (в реконструкции 65 Ma), Р – Раджмахала (в реконструкции 120 Ma)

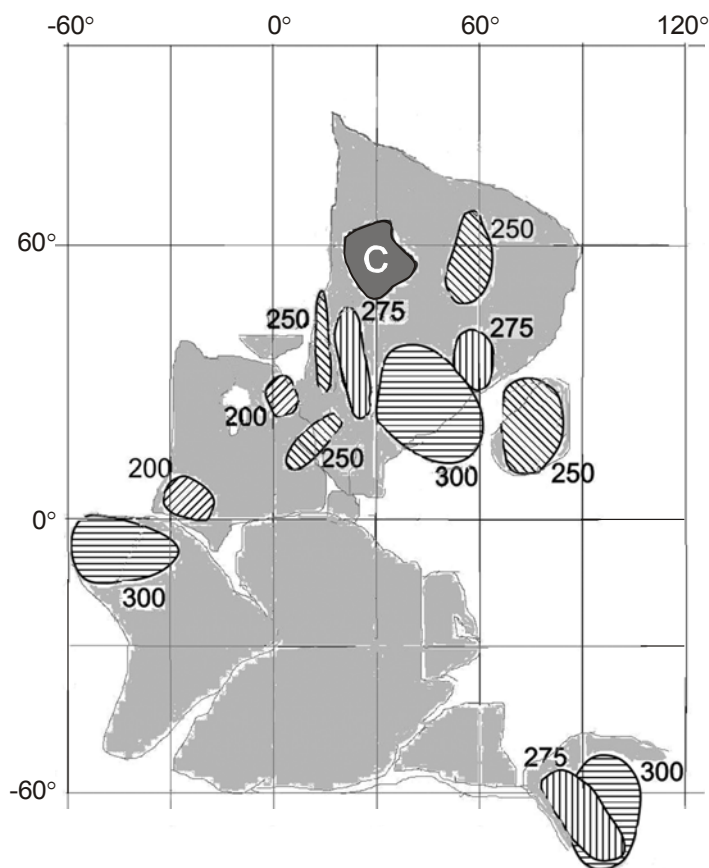


Рис. 10. Карта распространения компактных групп значений $S_p > 9^\circ$ триас–каменноугольного возраста. Цифры – возраст, относящийся к близлежащей области, млн. лет (разная штриховка соответствует разным возрастам). Контур с темно-серой заливкой – область распространения Сибирских траппов (С). Серой заливкой выделено примерное положение Пангеи для 250 Ma по [Torsvik, Van der Voo, 2000]. Положения всех контуров даны в палеореконструкциях соответствующего возраста [McElhinny, McFadden, 2000; Smethurst, Khramov, Torsvik, 1998; Torsvik, Van der Voo, 2000]

Можно видеть, что области возникновения плюмов разбросаны по всей поверхности ядра Земли; исключение составляют плюмы триас–пермь–каменноугольной системы, сосредоточенные в Евразийской части Пангеи (см. рис. 10).

Среди зафиксированных плюмов есть как относительно короткоживущие, так и длительносуществующие. Последние – это система плюмов, существующая от каменноугольного периода до современности (Афар?); Гренландский плюм, возникший примерно 80 млн. лет назад и существующий доныне (Исландия); Деканский плюм, образовавшийся примерно 100 млн. лет назад и существующий ныне (о. Реюньон); плюм восточнее о. Кергелен, образовавшийся в каменноугольном периоде; плюм Раджмахал, возникший 118 млн. лет назад и существующий ныне (о. Кергелен). Наконец, это Хамар-Дабанский плюм, образовавшийся примерно 50 млн. лет назад и существующий ныне (Азиатская магнитная аномалия).

Сложный (“наклонный”) путь подъема плюма подтверждается несовпадением местоположения максимума S_p с эпицентром плюма (см. рис. 9). К сожалению, вблизи эпицентров большинства древних плюмов палеомагнитные данные отсутствуют, но это можно проследить на примере современных плюмов для возрастного интервала 30–50 Ma. В общей картине распределения S_p в зависимости от расстояния до ближайших современных эпицентров плюмов прослеживается большой разброс (см. рис. 1), который усугубляется тем, что часть плюмов поднимались практически вертикально, часть –

более сложным путем. При осреднении данных видно, что максимум средней S_p находится на расстоянии 20° от эпицентров плюмов, т.е. примерно в 2000 км; с приближением к эпицентрам происходит спад среднего значения. Если мы считаем, что максимум амплитуды вариаций направления поля находится над местом зарождения плюма у границы ядро–мантия, то, следовательно, плюм поднимался не вертикально, а со смещением.

Рассмотрим пространственное распределение отмечаемых смещений, используя палеомагнитные данные, выбранные для интервала 30–50 Ma в точках, находящихся на расстоянии меньше 30° от ближайшего выхода современного плюма при $S_p > 12^\circ$ (учитывая, что S_p нормального поля в это время было 10° , см. рис. 4). Как отмечалось выше, распределение палеомагнитных данных чрезвычайно неравномерно – в большей своей части они тяготеют к Альпийскому и Тихоокеанскому поясам, а в пределах океанов, к которым приурочены многие центры современной плюмовой магматической активности, их почти нет (см. рис. 9). Однако просматривается общая тенденция: большинство точек палеомагнитных наблюдений с $S_p > 12^\circ$ и возрастом 30–50 Ma расположены к востоку и юго-востоку от ближайших центров современной плюмовой магматической активности (рис. 11), из чего можно заключить, что при подъеме плюм смещался к западу–северо-западу от области своего формирования у ядра Земли. Возможно, это следствие конвективного потока в мантии.

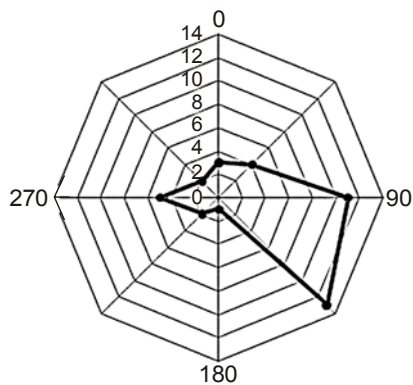


Рис. 11. Роза-диаграмма распределения по сторонам света числа точек палеомагнитных наблюдений с $S_p > 12^\circ$, ближайших к эпицентрам современных плюмов, возраст которых 30–50 Ma. Цифры 0–14 – число случаев в каждом румбе

Итак, разная длительность подъема плюма и смещение его эпицентра относительно места зарождения свидетельствуют о разных путях подъема плюмов, вероятных их остановках по пути следования, а преобладающая направленность смещения плюмов, возможно, отражает направление конвективного течения в мантии. Длительное существование плюмов не означает непрерывной активности на границе ядро–мантия, скорее – это серия кратковременных вспышек активности в одной из областей на ней [Ernst, Buchan, 2003].

Частота геомагнитных инверсий

Ранее отмечалось, что связь между инверсиями геомагнитного поля и плюмообразованием отсутствует [Печерский, 2007, 2009]. Остановившись очень кратко на самих инверсиях, попробуем объяснить причину этого отсутствия.

Для анализа частоты инверсий поля использована магнитохроностратиграфическая шкала фанерозоя [Молостовский, Печерский, Фролов, 2007], построенная на базе шкал геомагнитной полярности [Печерский, 1997; Храмов, Шкатова, 2000; Gradstein et al., 2004; Opdyke, Channell, 1996]. Отметим на горизонтальной оси графика частоты инверсий геомагнитного поля моменты, соответствующие проявлениям активного плюмового магматизма на поверхности Земли (рис. 12).

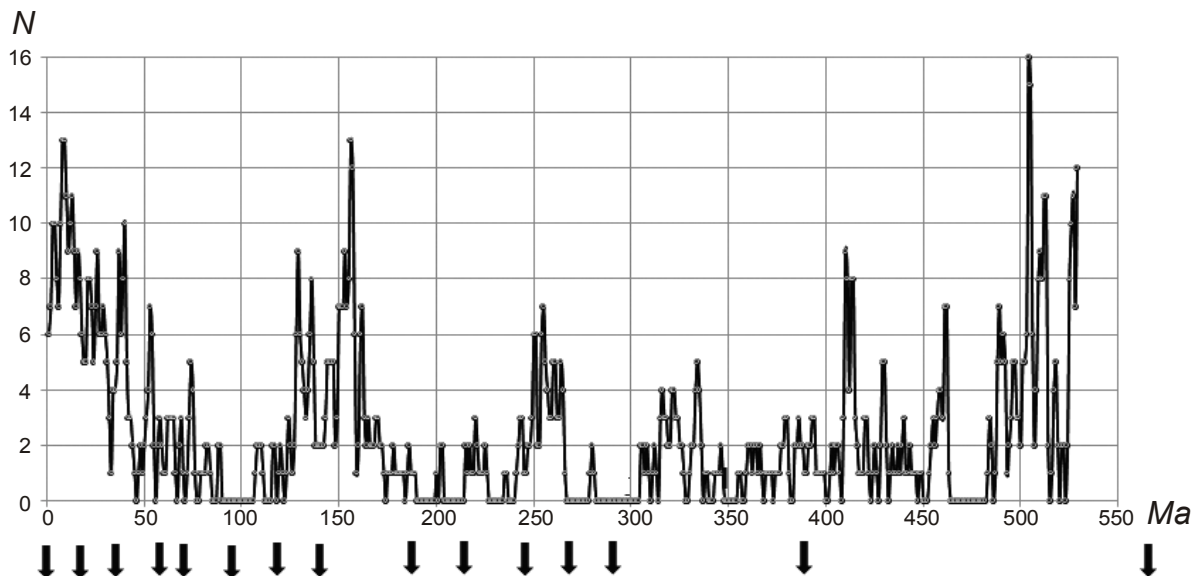


Рис. 12. Сопоставление частоты инверсий (число инверсий за 1 млн. лет) с временами магматической активности нижнемантийных плюмов на поверхности Земли [Ernst, Buchan, 2003]. Вертикальные стрелки под осью абсцисс – время магматической активности нижнемантийных плюмов, *Ma*

Можно видеть, что возраст эпицентров плюмов, как и время плюмообразования (если прибавить к возрасту эпицентров плюмов 20–50 млн. лет), совпадают с интервалами самых разных частот геомагнитных инверсий вплоть до полного их отсутствия в мелу (гиперхрон Джалал), пермо–карбоне (гиперхрон Киама) и в венде. Отмеченное свидетельствует скорее о полном отсутствии связи между процессами, вызывающими геомагнитные инверсии и образование плюмов. В то же время заметим, что образование плюмов происходит у границы жидкого ядра и мантии, из чего следует, что смена полярности геомагнитного поля, скорее всего, не связана с процессами на границе ядро–мантия.

Смена полярности геомагнитного поля может быть связана с изменением вращения внутреннего ядра относительно мантии и жидкого ядра, В фанерозое наблюдается явное преобладание *R*-полярности [Молостовский, Печерский, Фролов, 2007]. Это можно объяснить тем фактом, что Земля всегда вращалась, как ныне, против часовой стрелки. Такая полярность, вероятно, должна сохраняться, если вращение внутреннего, внешнего ядра и мантии совпадают или же если внутреннее ядро их обгоняет, что вполне возможно по ряду соображений:

а) известны комплексные наблюдения, из результатов которых следует, что внутреннее ядро подвижно и его осевое вращение отличается от вращения Земли в целом [Авсюк, Адушкин, Овчинников, 2001];

б) в течение фанерозоя происходило замедление суточного вращения Земли примерно на 3 ч [Манк, Макдональд, 1964]; теоретически показано, что в этом случае внутреннее ядро обгоняет мантию [Grotten, Molodensky, 1999];

в) прослежены периоды ускорения вращения Земли, например, последние несколько десятков лет [Сидоренков, 2004], в связи с чем вполне вероятно отставание вращения внутреннего ядра от вращения мантии. В таком случае возникает относительное обратное движение на границе между твердым и жидким ядром, с которым может быть связано поле противоположного знака, т.е. такого, как существует в настоящее время.

Выводы

Приведенные данные позволяют авторам сделать следующие выводы.

1. На фоне “нормального” поля видна единая для фанерозоя–венда тенденция роста амплитуды вариаций направления поля по мере приближения к эпицентрам нижнемантийных плюмов, которая четко выражается существованием двух основных мод на гистограммах распределения амплитуд. Эта же тенденция прослеживается по мере приближения к центрам современных ММА. Следовательно, перечисленные явления, вероятнее всего, имеют единую природу – они результат местного возбуждения в верхней части жидкого ядра.

2. Времена плюмообразования приходятся на самые разные частоты инверсий вплоть до полного их отсутствия, что говорит о разных источниках ММА, вариаций направления поля и плюмов, с одной стороны, и инверсий поля, с другой. Если источники первой группы явлений приурочены к границе ядро–мантия, то, более вероятно, что инверсии генерируются у границы жидкого и твердого ядра. При этом смена полярности поля, скорее всего, связана с изменением скорости вращения внутреннего ядра относительно мантии Земли. Изменение скорости может быть обусловлено такими процессами как приливная эволюция системы Луна–Земля, эволюция Земли в составе Солнечной системы и в общей эволюции Галактики.

3. “Отставание” магматической активности плюма на поверхности Земли от времени его возникновения у границы ядро–мантия соответствует времени, в течение которого происходит подъем плюма. Для всех рассмотренных плюмов продолжительность их подъема укладывается в ~20–50 млн. лет для всего фанерозоя–венда. Это служит отражением однообразия условий подъема плюмов в течение названного временного интервала и, следовательно, однообразие состояния мантии в то же время. Разная продолжительность подъема, очевидно, связана с разными путями подъема плюмов, “задержками” по пути и т.п. Смещение эпицентра плюма относительно места его зарождения подтверждается кайнозойскими данными, согласно которым среднее смещение максимума S_p от эпицентров плюмов составляет примерно 2000 км. Преобладающая направленность смещения плюмов к западу и северо-западу, возможно, отражает направление конвективного течения в мантии. Растянутость времени “отставания”, вероятно, является результатом образования в указанном интервале времени серии плюмов примерно в одной области на границе ядро–мантия.

4. В принципе, предлагаемый анализ поведения амплитуды вариаций направления геомагнитного поля относительно эпицентров плюмов может быть использован для разделения плюмов на те, образование которых связано с границей мантии и жидкого ядра, и те, образование которых не связано с ними. Но, надо отметить, что для этого необходима более полная и точная палеомагнитная и возрастная информация.

Литература

- Авсюк Ю.Н., Адушкин В.В., Овчинников В.М. Комплексное исследование подвижности внутреннего ядра // Физика Земли. 2001. № 8. С.64–75.
- Грачев А.Ф. Мантийные плюмы и проблемы геодинамики // Физика Земли. 2000. № 4. С.3–37.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал “Гео”, 2001. 408 с.
- Жарков В.Н., Карпов П.Б., Леонтьев В.В. О тепловом режиме погранслоя мантии на границе с ядром // Докл. АН СССР. 1984. Т. 275. С.335–338.
- Манк У., Макдональд Г. Вращение Земли. М.: Мир, 1964. 384 с.

- Молостовский Э.А., Печерский Д.М., Фролов И.Ю. Магнитохроностратиграфическая шкала фанерозоя и ее описание с помощью кумулятивной функции распределения // Физика Земли. 2007. № 10. С.15–23.
- Палеомагнитология / Под ред. А.Н. Храмова. Л.: Недра, 1982. 312 с.
- Печерский Д.М. Зависимость суммарной амплитуды палеовариаций направления геомагнитного поля от широты в неогее // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 36, № 5. С.130–136.
- Печерский Д.М. Некоторые характеристики геомагнитного поля за 1700 млн. лет // Физика Земли. 1997. № 5. С.3–20.
- Печерский Д.М. Изменения органического мира и геомагнитного поля в венде-фанерозое // Стратиграфия. Геол. Корреляция. 2000а. Т. 8. С.91–95.
- Печерский Д.М. Мировые магнитные аномалии и амплитуда вековых вариаций направления геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. 2000б. Т. 40. С.128–133.
- Печерский Д.М. Суммарная амплитуда вековых вариаций, мировые магнитные аномалии и плюмы // Физика Земли. 2001. № 5. С.85–91.
- Печерский Д.М. Геомагнитное поле на границах палеозоя/мезозоя, мезозоя/кайнозоя и нижнемантийные плюмы // Физика Земли. 2007. № 10. С.49–59.
- Печерский Д.М. Геомагнитное поле на границе протерозоя-палеозоя и нижнемантийные плюмы // Физика Земли. 2009. № 1. С.16–22.
- Сидоренков Н.С. Нестабильность вращения Земли // Вестн. РАН. 2004. Т. 74, № 8. С.701–715.
- Храмов А.Н., Шкатова В.К. Общая магнитостратиграфическая шкала полярности фанерозоя // Дополнения к стратиграфическому кодексу России. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. С.34–45.
- Barrera E., Johnson C. (ed.). The evolution of Cretaceous ocean climate systems // Geol. Soc. Amer. Special paper. 1999. V. 332. P.1–47.
- Courtillot V., Besse J. Magnetic field reversals, polar wander, and core-mantle coupling // Science. 1987. V. 237. P.1140–1147.
- Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. Three distinct types of hotspots in Earth's mantle // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. V. 205. P.295–308.
- Ernst R.E., Buchan K.L. Maximum size and distribution in time and space of mantle plumes: evidence from large igneous provinces // J. Geodynamics. 2002. V. 34. P.309–342.
- Ernst R.E., Buchan K.L. Recognizing mantle plumes in the geological record // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 2003. V. 31. P.469–523.
- Gradstein F.M., Ogg J., Smith A.G. A Geological Time Scale. Cambridge Univ. Press, 2004. 589 p.
- Groten E., Molodensky S.M. On the mechanism of the secular tidal acceleration of the solid inner core and the viscosity of the liquid core // Studia geoph. et geod. 1999. V. 43. P.20–34.
- Loper D. Mantle plumes // Tectonophysics. 1991. V. 187. P.373–384.
- McElhinny M.W., McFadden P.L. Paleomagnetism. Continents and Oceans. San Diego: Ac. Press, 2000. 386 p.
- Opdyke N.D., Channell J.E.T. Magnetic stratigraphy. Academic Press. Int. Geophys. Ser. 1996. V. 64. 346 p.
- Pechersky D.M., Garbuzenko A.V. The Mesozoic-Cenozoic Boundary: Paleomagnetic Characteristic // Russian J. Earth Sci. 2005. V. 7, N 2. <http://rjes.wdcb.ru>
- Richards M.A., Duncan R.A., Courtillot V.E. Flood basalts and hot-spot tracks: plume heads and tails // Science. 1989. V. 246. P.103–107.
- Smethurst M.A., Khramov A.N., Torsvik T.H. The Neoproterozoic and Palaeozoic palaeomagnetic data for the Siberian Platform: from Rodinia to Pangea // Earth Science Reviews. 1998. V. 43. P.1–24.
- Stacey F.D. Physics of the Earth. Brisbane: Brookfield Press, 1992. 513 p.
- Torsvik T.H., Van der Voo R. Refining Gondwana and Pangea palaeogeography: estimates of Phanerozoic non-dipole (octupole) fields // Geophys. J. Int. 2002. V. 151. P.771–794.

Сведения об авторах

ПЕЧЕРСКИЙ Диамар Михайлович – профессор, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел. 454-94-65. E-mail: diamar1@front.ru.

ШАРОНОВА Зинаида Васильевна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел. (499) 254-91-05. E-mail: zvsharonova@rambler.ru

GEOMAGNETIC FIELD IN THE PHANEROZOIC–VENDIAN AND LOWERMANTLE PLUMES

D.M. Pechersky, Z.V. Sharonova

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Data are summarized on behavior of amplitude of variations of the geomagnetic field direction (S) and reversals frequency in Phanerozoic–Vendian time, and their relations with lower mantle plums. Growth of S reaches a maximum often not in the plum epicenter. For example, in a case of Cenozoic plums, maximum S is away from epicenters within 2000 km on average. It demonstrates inclined lifting of plum. The displacement tendency of plums to the west and the northwest from the place of their formation is traced. Times of plum formation and times of their rise to the Earth surface belong to intervals with different frequency of geomagnetic reversals. Therefore interdependence between plums formation and reversals is absent. As growth of S and plum origin are connected with mantle-core boundary, then occurrence of reversals more probably is connected with an inner core boundary.

Keywords: paleomagnetic data, global magnetic anomalies, variations of geomagnetic field directions, reversals, plumes, Phanerozoic.