

УДК 550.383

ПОВЕДЕНИЕ ПАЛЕОНАПРЯЖЕННОСТИ И ИНТЕРВАЛОВ МЕЖДУ ИНВЕРСИЯМИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПОСЛЕДНИЕ 167 МЛН ЛЕТ

© 2018 г. А. Ю. Куражковский*, Н. А. Куражковская**, Б. И. Клайн***

*Геофизическая обсерватория “Борок” филиал Института физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), п. Борок, (Ярославская обл.)*

**e-mail: ksasha@borok.yar.ru*

***e-mail: knady@borok.yar.ru*

****e-mail: klain@borok.yar.ru*

Поступила в редакцию 10.02.2017 г.

После доработки 09.03.2017 г.

Приведены результаты сравнительного анализа поведения палеонапряженности и полярности (интервалов между инверсиями) геомагнитного поля в последние 167 млн лет. Обсуждаются сходство и различия в поведении этих характеристик геомагнитного поля. Показано, что всплески палеонапряженности и длительные интервалы между инверсиями имели место при высоких средних значениях палеонапряженности в мелу и палеогене. Вместе с тем между поведением палеонапряженности и режимом инверсий существуют различия: 1) характерные времена вариаций палеонапряженности меньше характерных времен частоты инверсий геомагнитного поля; 2) достижение максимума значений палеонапряженности на границе мел–палеоген и прекращение всплесков палеонапряженности после рубежа 45–40 млн лет не отмечено явными особенностями в поведении геомагнитной полярности.

DOI: 10.7868/S001679401801011X

1. ВВЕДЕНИЕ

Изменения древнего геомагнитного поля характеризуются изменениями палеонапряженности и частоты инверсий, либо длительностей полярных интервалов. Поведение характеристик геомагнитного поля является следствием процессов, происходящих в жидком ядре Земли. Однако при обсуждении эволюционных изменений работы геодинамо обычно анализируется только поведение геомагнитных инверсий, например, [Калашников и др., 2015; Галле и Павлов, 2016], а поведение палеонапряженности, как правило, не рассматривается. Поскольку в спектре изменений палеонапряженности и полярности геомагнитного поля присутствует цикличность с характерными временами, близкими к длительностям циклов Бертрана (около 200 млн лет) [Петрова и др., 2000], такой подход допустим при обсуждении изменений геомагнитного поля, происходящих на больших интервалах геологического времени (сотни млн лет). В ходе таких циклов значения палеонапряженности и частоты инверсий изменялись противофазно [Куражковский и др., 2008]. Следовательно, при изучении длиннопериодических процессов на основе данных о полярности геомагнитного поля можно составить пред-

варительное представление об изменениях палеонапряженности. При этом следует отметить, что цикличность в поведении геологических и геомагнитных процессов с подобными характерными временами обычно объясняется внешними, по отношению к земному ядру, причинами [Петрова и др., 2000].

Характерные времена процессов в ядре Земли имеют длительность на порядки меньшую, чем сотни миллионов лет. При этом, как следует из данных о частоте смен геомагнитной полярности, например, [Gradstein et al., 2008] и изучения вариаций палеонапряженности в последние 4.5 млн лет [Valet and Meynadier, 1993], поведение этих характеристик геомагнитного поля существенно различается. В связи с этим, вопрос о корректности заключений о процессах в земном ядре, сделанных на основе анализа поведения только одной характеристики геомагнитного поля (поведения полярности), остается открытым.

Степень изученности поведения полярности и палеонапряженности геомагнитного поля не одинакова. Так, поведение полярности геомагнитного поля подробно изучено на интервале средняя юра–современность. На этом интервале исследовались вариации частоты инверсий с ха-

рактными временами несколько миллионов лет [Mazaud et al., 1983; Добрецов 1997; Петрова и др., 2000]. Непрерывные данные о вариациях палеонапряженности получены только для последних 4.5 млн лет [Valet and Meynadier, 1993]. Наиболее известный массив данных палеонапряженности, полученный по термонамагнитным породам и обобщенный в мировой базе данных PINT [Biggin et al., 2010] из-за неравномерности проявления магматизма и недостаточной точности изотопных датировок, не позволяет изучать ее вариации с характерными временами, меньше нескольких десятков миллионов лет. Таким образом, прогресс в изучении поведения древнего геомагнитного поля, в основном, лимитируется степенью исследованности поведения палеонапряженности.

В последние годы появились подробные реконструкции поведения палеонапряженности по осадочным породам юры–неогена [Ohneiser et al., 2013; Yamazaki et al., 2013; Yamamoto et al., 2014; Куражковский и др., 2015а, б; 2016]. Обобщение результатов этих работ впервые позволяет сделать заключение об изменениях палеонапряженности на интервале средняя юра–современность.

Целью настоящей работы является исследование поведения палеонапряженности в последние 167 млн лет и ее связи с режимом полярности геомагнитного поля.

2. АНАЛИЗИРУЕМЫЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Все современные определения напряженности древнего геомагнитного поля, полученные как по осадочным, так и по термонамагнитным породам, свидетельствуют о том, что его значения изменялись в широких пределах (более чем на порядок). При этом только данные, полученные по осадочным породам, могут быть с хорошей точностью привязаны к шкале геологического времени и использоваться для оценки характерных времен вариаций палеонапряженности. Для получения детальной картины поведения палеонапряженности на большом (167 млн лет) интервале геологического времени мы провели обобщение фрагментарных данных, выполненных по различным осадочным толщам и представленных в различных публикациях: [Куражковский и др., 2015а, б; 2016] – (167–45 млн лет), [Cronin et al., 2001] – (99–85 млн лет), [Yamamoto et al., 2014] – (40–23 млн лет), [Ohneiser et al., 2013] – (19–12 млн лет), [Valet and Meynadier, 1993] – (последние 4.5 млн лет).

Для синтеза этих различных массивов данных в единую картину поведения палеонапряженности мы провели их калибровку. Калибровка авторских данных проводилась по методике, в которой использовалось переосаждение [Kurazhkovskii

et al., 2011]. Точность определения палеонапряженности по осадочным породам с использованием переосаждения обычно бывает не ниже чем 20% от величины естественного магнитного поля [Kurazhkovskii et al., 2011]. Калибровка результатов определений палеонапряженности из работ [Cronin et al., 2001; Yamamoto et al., 2014; Ohneiser et al., 2013] осуществлялась с использованием результатов определений палеонапряженности по термонамагнитным породам из базы данных PINT (2015.05) (<http://earth.liv.ac.uk/pint/>), описание которой приведено в работе [Biggin et al., 2010]. Мы не пересчитывали значения палеонапряженности H/H_0 (H – напряженность древнего геомагнитного поля, H_0 – средняя напряженность современного геомагнитного поля, равная 40 мкТл) в значения виртуально дипольного момента (VDM) по следующей причине. Динамика палеонапряженности и дипольного момента с хорошей точностью совпадают. Вопрос о соответствии VDM истинному значению земного дипольного магнитного момента для удаленных интервалов геологического времени пока не решен. Поэтому целесообразность перевода значений H/H_0 в значения VDM нам не кажется очевидной.

Авторские данные палеонапряженности юры–палеогена базируются на результатах исследования 1296 осадочных горизонтов [Куражковский и др., 2015а, б; 2016]. Таким образом, временное разрешение, с которым могут исследоваться вариации палеонапряженности по этим данным, составляет первые сотни тысяч лет. Определения палеонапряженности из работ [Cronin et al., 2001; Yamamoto et al., 2014; Ohneiser et al., 2013] имеют более высокое временное разрешение. В настоящей публикации мы не исследовали поведение палеонапряженности с максимально возможной подробностью и ограничились исследованием ее вариаций с характерными временами несколько миллионов лет.

Для сравнения поведения палеонапряженности с поведением полярности геомагнитного поля нами использована геологическая временная шкала [Gradstein et al., 2008] и подробная версия общей шкалы геомагнитной полярности из работы [Гужиков и др., 2007]. Графическое представление поведения полярности геомагнитного поля построено следующим образом: по оси абсцисс откладывалось время инверсий геомагнитного поля, по оси ординат – продолжительность полярных интервалов между инверсиями. Такое представление режима полярности точно соответствует данным шкалы полярности и позволяет получить наглядное представление, как о поведении продолжительностей полярных интервалов, так и частоты инверсий геомагнитного поля.

3. ПОВЕДЕНИЕ ПАЛЕОНАПРЯЖЕННОСТИ

На рисунке 1а показано поведение палеонапряженности в интервале 167–12 млн лет. Как видно из рис. 1а, на всем исследованном интервале имели место вариации палеонапряженности с малыми характерными временами. В ходе этих вариаций значения палеонапряженности могли изменяться в десятки раз. Такие изменения палеонапряженности многократно превышают ошибки метода ее определения и, следовательно, в большей степени связаны с поведением самого геомагнитного поля, чем с влиянием условий осадконакопления. Характерные времена подобных (“высокочастотных”) изменений палеонапряженности соизмеримы с разрешением, которое позволяют получить используемые данные.

В изменении амплитуд высокочастотных вариаций палеонапряженности можно обнаружить определенные закономерности или структуры. Так, достаточно отчетливо видна перемежаемость (рис. 1а) изменений палеонапряженности малой амплитуды (порядка $0.5 H/H_0$) с ее всплесками. Во время всплесков значения палеонапряженности могли достигать $5 H/H_0$. Амплитуды всплесков увеличивались от юры к концу мела— началу палеогена. Одновременно с амплитудой увеличивались и интервалы между всплесками палеонапряженности. По имеющимся данным в юре—начале палеогена можно обнаружить около 15 циклов, в ходе которых значительно изменялась амплитуда вариаций палеонапряженности. Установить количество этих циклов более точно пока не позволяют пробелы в данных. Характерные времена подобных циклических изменений палеонапряженности составляли несколько миллионов лет (в среднем 6 млн лет). В середине палеогена (на рубеже 45–40 млн лет) всплески палеонапряженности прекратились. В дальнейшем изменения палеонапряженности имели относительно небольшую амплитуду, которая, как правило, не превышала $1H/H_0$.

На рисунке 1б результаты определений палеонапряженности сглажены 10 точечным фильтром. Это позволило оценить вариации усредненных значений палеонапряженности. Периодичность и амплитуды этих вариаций возрастали от юры к границе мел—палеоген (65 млн лет) и затем убывали в течение палеогена—неогена. В последние 4.5 млн лет [Valet and Meynadier, 1993] характерные времена изменений палеонапряженности не превышали несколько сотен тысяч лет.

Результаты определений палеонапряженности по термонамагнитным породам, приведенные на рис. 1в, не противоречат выводам о ее поведении, полученным по осадочным породам. По этим данным также можно сделать заключение о существовании всплесков палеонапряженности, которые начались в начале мела и прекратились в палеогене. Подтверждением существо-

вания всплесков является наличие высоких значений палеонапряженности на этом интервале геологического времени. Ранее в работе [Куражковский и др., 2015а] было показано, что оценки средних (за геологические эпохи юры, мела и палеогена) значений палеонапряженности по осадочным и термонамагнитным породам не различаются. При этом данные, полученные по термонамагнитным породам, не позволяют изучать вариации палеонапряженности с характерными временами порядка первых миллионов лет.

Обобщение результатов определений палеонапряженности по осадочным породам позволило обнаружить ряд особенностей ее поведения, которые в дальнейшем могут представлять интерес для изучения динамики процессов, происходящих в ядре Земли. К таким особенностям можно отнести: 1) перемежаемость вариаций палеонапряженности малой амплитуды с ее всплесками на интервале 167–45 млн лет; 2) прекращение всплесков палеонапряженности после рубежа 40 млн лет; 3) рост амплитуд и характерных времен вариаций палеонапряженности до границы мел—палеоген или палеозой—мезозой; 4) уменьшение амплитуд и периодичностей вариаций палеонапряженности от границы мел—палеоген к современности.

4. РАЗЛИЧИЯ В ПОВЕДЕНИИ ПАЛЕОНАПРЯЖЕННОСТИ И РЕЖИМА ИНВЕРСИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

На рисунках 1г, д показаны изменения продолжительностей полярных интервалов согласно шкалам из работ [Gradstein et al., 2008; Гужиков и др., 2007]. Как видно из рисунков, представления о поведении полярности геомагнитного поля в значительной степени зависят от подробности используемых шкал полярности. Так, согласно шкале [Gradstein et al., 2008] наиболее значимым событием в поведении полярности геомагнитного поля было значительное возрастание длительностей полярных интервалов в середине мелового периода (мелового суперхрона). Из рисунка 1г видно, что продолжительности полярных интервалов значительно возросли в середине мела. При подробном исследовании отложений мелового периода [Гужиков и др., 2007] обнаружены эпизоды обратной полярности, которые делят меловой суперхрон на ряд менее продолжительных интервалов (рис. 1д). С учетом этих эпизодов обратной полярности исчезают явные различия между поведением полярности геомагнитного поля в мелу и в палеогене. Таким образом, в зависимости от подробности используемых данных представление о поведении полярности геомагнитного поля может в значительной степени изменяться.

Если не обсуждать проблему количества интервалов обратной полярности в меловом суперх-

Таблица 1. Средние значения палеонапряженности и частоты инверсий за геологические эпохи средней юры–палеогена

Геологические эпохи	Средние значения H/H_0	Частота инверсий, млн ⁻¹
Pg3	0.56	2.5
Pg2	0.66	1.6
Pg1	0.84	1.1
K2	0.89	0.4
K1	0.57	1.2
J3	0.4	4.3
J2	0.5	6.5

роне, то согласно рассмотренным шкалам, явные изменения в поведении полярности произошли в начале мела (длительности полярных интервалов возросли) и в конце палеогена (длительности полярных интервалов уменьшились). Таким образом, в грубом приближении изменения продолжительностей полярных интервалов совпадают с изменениями палеонапряженности (рис. 1а, з, д, табл. 1). На интервале мел–палеоген были относительно высокие средние значения палеонапряженности и средние продолжительности полярных интервалов. В мелу–палеогене имели место всплески палеонапряженности и интервалы полярности большой (более миллиона лет) длительности, которые можно считать “всплесками продолжительностей полярных интервалов”.

Детальное сопоставление данных палеонапряженности (рис. 1а, б, в) с режимом полярности (рис. 1з, д) позволяет обнаружить различия в поведении этих характеристик геомагнитного поля. Так, значительное возрастание средних значений палеонапряженности и характерных времен ее вариаций на границе мел – палеоген не отмечено особенностями в поведении геомагнитной полярности. Прекращение всплесков палеонапряженности на рубеже 40–45 млн лет также не повлияло на режим полярности геомагнитного поля. По оценкам, представленным в различных публикациях [Mazaud et al., 1983; Добрецов 1997; Петрова и др., 2000], характерные времена вариаций длительностей полярных интервалов или частоты инверсий составляют около 15 млн лет. Вариации палеонапряженности, в среднем, имеют меньшую длительность (около 6 млн лет).

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Различия в поведении инверсий геомагнитного поля и палеонапряженности могут иметь существенное значение при обсуждении связи процессов, происходящих в ядре и на земной поверхности, а также при оценках скорости теплопередачи в земной мантии. Оценки скорости передачи тепла

от ядра к литосфере обычно базируются на сопоставлении особенностей поведения характеристик геомагнитного поля с процессами на земной поверхности (активизациями магматизма, рифтинга – складчатости, трансгрессий – регрессий, сменой геологических эр) [Храмов и др., 1982; Петрова и др., 2000]. Поскольку между динамикой палеонапряженности и частоты инверсий имеются различия, то подобные оценки скорости теплопередачи в мантии могут различаться в зависимости от того, какая характеристика геомагнитного поля используется для проводимого исследования.

При обсуждении процессов, происходящих в земном ядре, часто используется постулат о существовании связи между изменениями характеристик геомагнитного поля и конвекционными процессами во внешнем жидком ядре, например, [Соколов, 2004; Решетняк и Павлов, 2016]. В настоящее время этот постулат обычно не встречает принципиальных возражений. Однако заключения о динамике процессов в земном ядре, сделанные на основе анализа поведения геомагнитных инверсий, либо палеонапряженности, могут принципиально различаться между собой. Например, в работе [Галле и Павлов, 2016] анализируется поведение полярности геомагнитного поля. При этом предполагается, что увеличение частоты геомагнитных инверсий связано с активизацией процессов в ядре Земли. Уменьшение частоты инверсий связывается со стабилизацией этих процессов. Как видно из рис. 1з, д и табл. 1, на исследуемом временном интервале частота инверсий имела максимальные значения в юре и в неогене, а минимальные в мелу и палеогене. Таким образом, согласно [Галле и Павлов, 2016] процессы в ядре активизировались в юре и неогене по сравнению с мелом. Результаты определений палеонапряженности дают основание предположить, что динамика тепловых конвекционных процессов была иной. Максимальное возрастание средних значений палеонапряженности и амплитуд ее всплесков имело место в мелу–начале палеогена (рис. 1а, б). Предположение о том, что для поддержания высоких средних значений и всплесков палеонапряженности требуется соответствующее энергетическое обеспечение, представляется достаточно логичным. Следовательно, по данным палеонапряженности в мелу начале–палеогена активность процессов в ядре была выше, чем на других исследованных интервалах геологического времени.

Таким образом, анализ поведения различных характеристик геомагнитного поля на одном и том же интервале геологического времени позволяет делать принципиально различные заключения о динамике процессов, происходивших в ядре Земли. Это свидетельствует о том, что проблема экстраполяции данных о поведении геомагнитного поля на физические процессы в жидком ядре окончательно не решена. В связи с этим, при

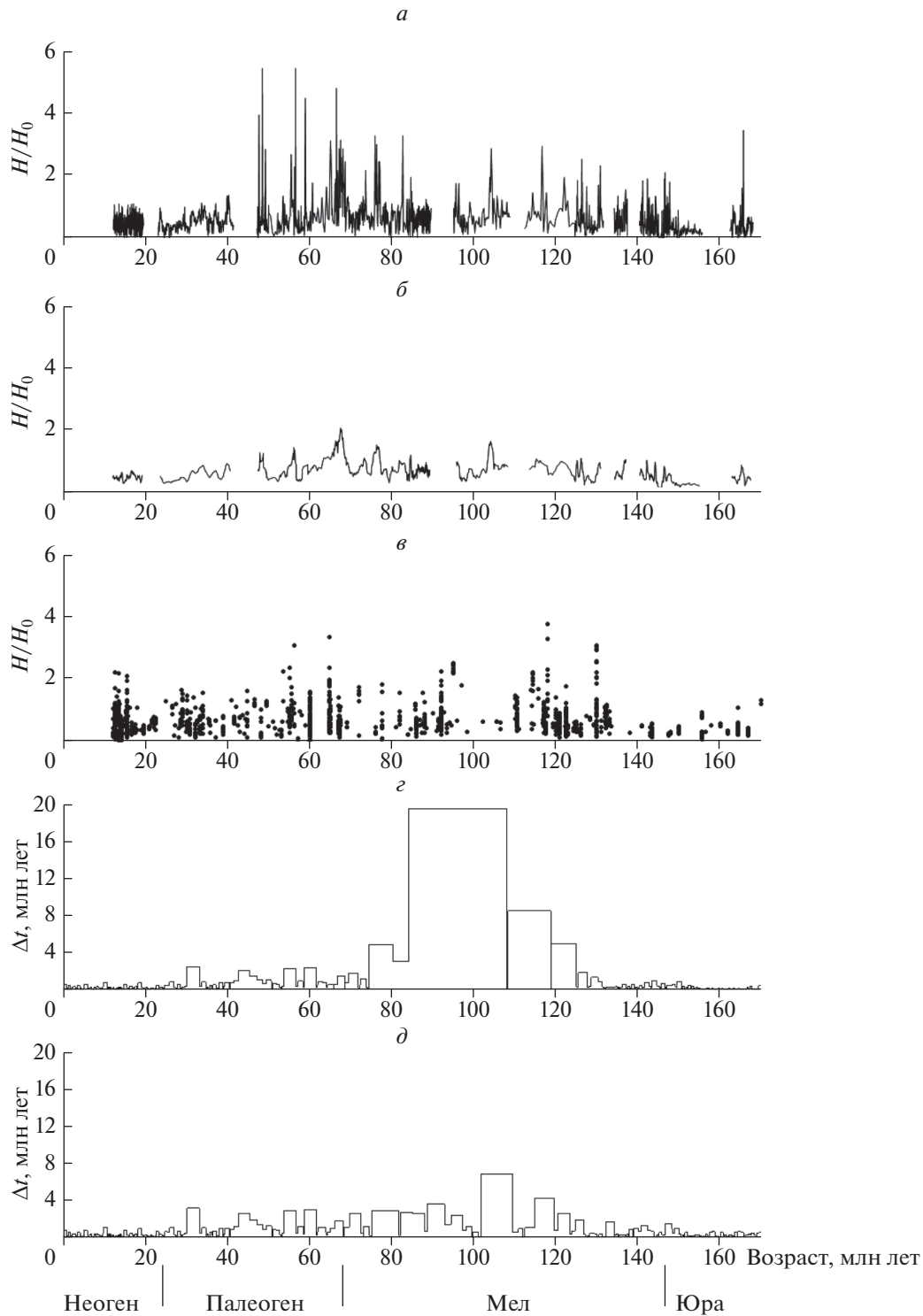


Рис. 1. Поведение палеонапряженности на интервале 167–12 млн лет (а); данные палеонапряженности, сглаженные 10-ти точечным фильтром (б); результаты определений палеонапряженности по термонамагнитным породам из базы данных PINT (в); изменение продолжительностей полярных интервалов согласно [Gradstein et al., 2008] (г) и [Гужиков и др., 2007] (д).

обсуждении особенностей работы геодинамио на различных интервалах геологического времени необходимо анализировать не только шкалу полярности, но и данные палеонапряженности.

Точно установить функциональную связь между характеристиками геомагнитного поля достаточно сложно. Это связано с тем, что накопление результатов определений палеонапряженно-

сти и инверсий геомагнитного поля по-разному влияет на общую картину их поведения. Как было показано в работе [Куражковский и др., 2015a], результаты определений средних (за геологические эпохи) значений палеонапряженности (при достаточном количестве данных) не зависят от методики ее определений и генезиса используемых для этого пород. Новые результаты определений палеонапряженности (конца мезозоя—кайнозоя) не влияют на ранее полученные оценки ее средних значений. Данные о частоте инверсий могут значительно различаться в зависимости от вида пород, используемых для их получения (рис. 1з, д). Так, в меловом гиперхроне (интервал 125–85 млн лет) согласно шкале [Gradstein et al., 2008], которая, в основном, базируется на результатах исследования магнитных аномалий, имели место три коротких интервала обратной полярности. По осадочным породам, отобраным на Русской плите и прилегающих территориях, на этом же временном интервале обнаружено до 20 эпизодов обратной полярности [Гужиков и др., 2007]. В юре (при частой смене полярности) по морским отложениям обнаруживается меньшее количество инверсий геомагнитного поля, чем по магнитным аномалиям. Таким образом, оценка количества инверсий в юре и мелу во многом зависит от генезиса пород, используемых для изучения поведения геомагнитной полярности. Обнаружение интервалов аномальной полярности в средней—верхней юре [Пименов и Ямпольская, 2008; Steiner, 2003] предполагает, что вопрос о точном количестве геомагнитных инверсий в это время не имеет решения. В связи с этим точное установление функциональной связи между поведением палеонапряженности и частоты инверсий геомагнитного поля на всем рассмотренном нами временном интервале, по-видимому, невозможно. На качественном уровне имеющиеся данные подтверждают справедливость вывода о существовании обратной зависимости частоты инверсий геомагнитного поля от средних значений палеонапряженности (рисунок и таблица). Сопоставление данных о длительностях полярных интервалов и напряженности геомагнитного поля в мелу—палеогене (таблица) показало, что средние значения частоты инверсий и палеонапряженности на этом интервале изменялись почти одинаково (примерно в 2 раза). В мелу—среднем палеогене повышались средние значения продолжительности полярных интервалов и величины палеонапряженности. При этом имели место “всплески” как продолжительностей полярных интервалов, так и значений палеонапряженности. Во время “всплесков” продолжительности полярных интервалов и величина палеонапряженности могли в несколько раз превышать средние (за геологическую эпоху) значения. При этом надо отметить, что длительности полярных интервалов и значения палеонапряженности —

это два различных случайных процесса, о чем свидетельствует экспоненциальный и степенной характер их распределения [Куражковский и др., 2015a].

Естественно возникает вопрос, существуют ли модели, в которых описанное поведение магнитного поля на качественном уровне находит подтверждение? Если обратиться к простым моделям, объясняющим инверсии магнитного поля Земли, например, [Моффат, 1980; Шалимов, 2004; Petrelis, 2009; Собко и др., 2012; Калашников и др., 2015], то в них вариации напряженности магнитного поля, по всей видимости, не связаны с продолжительностями интервалов между инверсиями магнитного поля. В то же время, численные решения реалистичных моделей динамо позволяют сделать заключение о том, что усиление теплового потока вблизи географических полюсов приводит к уменьшению числа инверсий и усилению степени дипольности геомагнитного поля. Кроме того, симметричное распределение теплового потока относительно экватора усиливает напряженность магнитного поля. С последним, по-видимому, можно связать усиление магнитного поля во время гиперхронов преимущественно одной полярности (интервал 130–30 млн лет, гиперхроны Джалал и Хорезм). Таким образом, конвекция в мантии, связанная с особенностями поведения тепловых потоков, может влиять на продолжительности полярных интервалов и величину геомагнитного диполя, например, [Решетняк, 2014; Решетняк и Павлов, 2016].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместный анализ данных о поведении палеонапряженности и полярности геомагнитного поля в средней юре—неогене (167–12 млн лет) позволил обнаружить следующие закономерности.

На всем исследованном интервале имели место хаотические изменения палеонапряженности с амплитудой порядка $0.5 H/H_0$. На интервале 167–45 млн лет хаотические вариации палеонапряженности перемежались ее всплесками. Во время всплесков амплитуда изменений палеонапряженности могла достигать $5 H/H_0$. Интервалы между всплесками и их амплитуда увеличивались от конца юры (150 млн лет) до начала палеогена (45 млн лет). Всплески палеонапряженности прекратились на рубеже 45–40 млн лет. После рубежа 40 млн лет имели место относительно небольшие (не более $1 H/H_0$) циклические изменения амплитуд вариаций палеонапряженности. Продолжительности этих циклов убывали от рубежа 45–40 млн лет к современности.

Показано, что всплески палеонапряженности и интервалы полярности большой продолжительности имели место при высоких средних значе-

ниях палеонапряженности (в мелу–палеогене). В то же время в динамике палеонапряженности и частоты инверсий геомагнитного поля существуют различия. Наиболее значимое изменение в поведении палеонапряженности, произошедшее на рубеже 40 млн лет, не отмечено значительными изменениями в поведении полярности геомагнитного поля. Характерные времена изменений частоты инверсий или продолжительностей полярных интервалов (порядка 15 млн лет) отличаются от характерных времен изменений палеонапряженности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Галле И., Павлов В.Э. Три режима работы геодинамо // Физика Земли. № 2. С. 148–153. 2016.
- Гужиков А.Ю., Барбошкин Е.Ю., Фомин В.А. Магнитостратиграфическая шкала меловой системы: современное состояние, проблемы построения и перспективы развития / Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии. Ред. Первушов Е.М. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, С. 69–86. 2007.
- Добрецов Н.Л. Мантийные суперплюмы как причина главной геологической периодичности и глобальных перестроек // Докл. РАН. Т. 357. № 6. С. 797–800. 1997.
- Калашников И.Ю., Соколов Д.Д., Четкин В.М. Статистика инверсий геомагнитного диполя по данным палеомагнитных наблюдений и простых моделей геодинамо // Физика Земли. № 3. С. 68–77. 2015.
- Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Клайн Б.И. Связь напряженности геомагнитного поля и особенностей его вариаций с частотой инверсий // ДАН. Т. 420. № 2. С. 243–247. 2008.
- Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Клайн Б.И. Стохастическое поведение геомагнитного поля в средней юре–палеогене // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 2. С. 235–246. 2015а.
- Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Багаева М.И., Гужикова А.А. О возможных изменениях напряженности геомагнитного поля в титоне–берриасе и кампане–маастрихте // Изв. Саратов. ун-та. Новая серия. Серия науки о Земле. Т. 15. Вып. 2. С. 41–46. 2015б.
- Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Суринский А.М. Определение палеонапряженности по разрезу эоцена плато Актолагай // Изв. Саратов. ун-та. Новая серия. Серия науки о Земле. Т. 16. Вып. 3. С. 172–178. 2016. doi 10.18500/1819-7663-2016-16-3-172-178
- Моффат Г. Возбуждение магнитного поля в проводящей среде. М.: Мир, 339с. 1980.
- Петрова Г.Н., Печерский Д.М., Храмов А.Н. Палеомагнитология – наука, созданная в XX веке // Физика Земли. № 9. С. 80–102. 2000.
- Пименов М.В., Ямпольская О.Б. Сводный магнитостратиграфический разрез средней–верхней юры Русской плиты / Очерки по региональной геологии: к 70-летию кафедры общей геологии и полезных ископаемых геологического факультета и 100-летию Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. Сб. науч. тр. Ред. Староверова В.Н. Саратов: Издательский центр “Наука”, С. 68–81. 2008.
- Собко Г.С., Задков В.Н., Соколов Д.Д., Трухин В.И. Инверсии геомагнитного поля в простой модели геодинамо // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 2. С. 271–277. 2012.
- Соколов Д.Д. Геодинамо и модели генерации геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 5. С. 5791–589. 2004.
- Решетняк М.Ю. Нелинейность в модели геодинамо Паркера // Геофиз. исслед. Т. 15. № 2. С. 15–28. 2014.
- Решетняк М.Ю., Павлов В.Э. Эволюция дипольного геомагнитного поля. Наблюдения и модели // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 1. С. 117–132. 2016.
- Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А. Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С., Родионов В.П., Слауцитайс И.А. Палеомагнитология / Ред. Храмов А.Н. Л.: Недра, 312 с. 1982.
- Шалимов С.Л. О механизме нестабильности геодинамо // Физика Земли. № 4. С. 3–7. 2014.
- Biggin A.J., McCormack A., Roberts A. Paleointensity database updated and upgraded // EOS Trans. Atmos. Geophys. Un. V. 91. № 15. 2010. doi 10.1029/2010EO020003
- Cronin M., Tauxe L., Constable C., Selkin P., Pick T. Noise in the quiet zone // Earth and Planetary Science Letters. V. 190. P. 13–30. 2001.
- Gradstein F.M., Ogg G.J., van Kranendonk M. On the Geologic Time Scale 2008 // News letters on stratigraphy. V. 43/1. P. 5–13. 2008.
- Kurazhkovskii A.Yu., Kurazhkovskaya N.A., Klain B.I. Calibration of geomagnetic paleointensity data based on re-deposition of sedimentary rocks // Physics of the Earth and Planetary Interiors. V. 189. Issues 1–2. P. 109–116. 2011. doi 10.1016/j.pepi.2011.08.002
- Mazaud A., Laj C., Laurent de Seze, Verosub K.L. 15-Myr periodicity in the frequency of geomagnetic reversals since 100 Myr // Nature. V. 304. P. 328–330. 1983.
- Ohneiser C., Acton G., Channell J.E.T., Wilson G.S., Yamamoto Y., Yamazaki T. A middle Miocene relative paleointensity record from the Equatorial Pacific // Earth and Planetary Science Letters. V. 374. P. 227–238. 2013.
- Petrelis F., Fauve S., Dormy E., Valet J.-P. Simple mechanism for reversals of Earth’s magnetic field // Phys. Rev. Lett. V. 102. P. 144503. 2009. doi 10.1103/PhysRevLett.102.144503
- Steiner M.B. A cratonic Middle Jurassic paleopole: Cretaceous-Oxfordian stillstand (J-2 cusp), rotation of the Colorado Plateau, and Jurassic North American apparent polar wander // Tectonics. V. 22. № 3. P. 1020. 2003. doi 10.1029/2001TC001284
- Yamazaki T., Yamamoto Y., Acton G., Guidry E., Richter C. Rock-magnetic artifacts on long-term relative paleointensity variations in sediments // Geochem. Geophys. Geosyst. V. 14. № 1. P. 23–42. 2013.
- Yamamoto Y., Yamazaki T., Acton G.D., Richter C., Guidry E.P., Ohneiser C. Palaeomagnetic study of IODP Sites U1331 and U1332 in the equatorial Pacific-extending relative geomagnetic palaeointensity observations through the Oligocene and into the Eocene // Geophys. J. Int. V. 196(2). P. 694–711. 2014.
- Valet J.-P., Meynadier L. Geomagnetic field in intensity and reversals during the past four million years // Nature. V. 366. P. 234–238. 1993.