УДК 550.383

# СТОХАСТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В СРЕДНЕЙ ЮРЕ–ПАЛЕОГЕНЕ

© 2015 г. А. Ю. Куражковский, Н. А. Куражковская, Б. И. Клайн

Геофизическая обсерватория "Борок" — филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, п. Борок (Ярославская обл.)

e-mails: ksasha@borok.yar.ru; knady@borok.yar.ru; klain@borok.yar.ru

Поступила в редакцию 21.04.2014 г.

После обработки 25.05.2014 г.

Исследовано распределение значений палеонапряженности и продолжительностей интервалов между инверсиями геомагнитного поля (полярных интервалов), соответствующих различным геологическим эпохам. Обнаружено, что в большинстве случаев стохастические ряды данных палеонапряженности наилучшим образом аппроксимируются степенной функцией. Показатели степенных распределений изменялись в зависимости от интервалов геологического времени, которым принадлежали анализируемые палеомагнитные данные. Распределения продолжительностей полярных интервалов аппроксимировались экспоненциальной функцией. Показатели экспоненты также изменялись в зависимости от интервалов геологического времени, которым принадлежали анализируемые палеомагнитные данные. Распределения продолжительностей полярных интервалов аппроксимировались экспоненциальной функцией. Показатели экспоненты также изменялись в зависимости от интервалов геологического времени. В результате проведенного анализа обнаружено, что наиболее значимые изменения в поведении палеонапряженности произошли в палеогене вблизи границы палеоцен—эоцен. На основе анализа палеомагнитных данных сделано предположение о значимой роли турбулентности магнитоактивной среды в генерации геомагнитного поля Земли. Турбулентность магнитоактивной среды усиливалась в мелу по сравнению с юрой и палеогеном.

DOI: 10.7868/S0016794015010083

# 1. ВВЕДЕНИЕ

Представления о связи между поведением характеристик геомагнитного поля с процессами в жидком ядре, в основном, базируются на результатах теории геомагнитного динамо. Известны попытки исследования процессов в жидком ядре нашей планеты на основе поиска аналогий в поведении различных оболочечных магнитоактивных сред. Так, имеется ряд работ, в которых проводятся аналогии в поведении магнитного поля Земли, Солнца, планет и процессов, происходящих в магнитосфере Земли, например [Зельдович и др., 2006]. Находить подобие в поведении главного магнитного поля Земли, Солнца и магнитосферных процессов позволяет изучение статистических свойств распределения длительностей полярных интервалов и значений напряженности древнего геомагнитного поля. Кроме того, на основе изучения поведения характеристик древнего геомагнитного поля можно делать заключения об эволюционных изменениях состояния среды, в которой происходила генерация геомагнитного поля [Добрецов, 1997].

Исследования распределений длительностей полярных интервалов начались одновременно с появлением первых шкал полярности. Например, в работах [Сох, 1968; Рузмайкин и Трубихин, 1992], которые проведены в различное время, показано, что распределение продолжительностей полярных интервалов кайнозоя хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией. Результаты работ [Иванов, 1996; Печерский и др., 1997] показали, что режим полярности геомагнитного поля имеет степенной характер на длительных интервалах геологического времени. Распределение продолжительностей полярных интервалов мезозоя-кайнозоя в зависимости от выбранной шкалы полярности могут аппроксимироваться как степенной, так и экспоненциальной функцией [Клайн и др., 2009]. С одной стороны, это свидетельствует о том, что процессы в земном ядре нестационарны и изменяются в течение геологического времени. С другой стороны, исследования режима геомагнитной полярности мезозоя нельзя считать завершенными.

Широкому использованию результатов определений палеонапряженности для исследования процессов в ядре Земли мешает недостаточно подробная изученность этой характеристики геомагнитного поля. Исследования напряженности геомагнитного поля позднего мезозоя-кайнозоя были основаны на данных, выполненных по термонамагниченным породам. В ряде обзорных работ [Valet, 2003; Biggin and Thomas, 2003; Heller et al., 2003; Tarduno et al., 2006; Tauxe and Yamazaki, 2007] проводился анализ распределений значений палеонапряженности. Например, в работе [Heller et al., 2003]



**Рис. 1.** Динамика изменений напряженности геомагнитного поля в интервале (168–23) млн лет по осадочным (*a*) и по термонамагниченным (*б*) породам. Ниже оси абсцисс указана принадлежность фрагментов палеонапряженности геологическим эпохам согласно определениям, выполненным в работах [Богачкин, 2004;. Гужиков и др., 2007; Пименов и Ямпольская, 2008].

было показано, что в зависимости от интервалов геологического времени распределение значений палеонапряженности могло быть либо одномодальным, либо бимодальным. На основе анализа распределений в этой же работе сделано предположение о существовании двух источников геомагнитного поля. При этом было указано, что для уверенных выводов о работе геодинамо имеющихся данных недостаточно.

В последние годы получены новые определения палеонапряженности по осадочным породам юры—палеогена [Куражковский и др., 2011; 2012; Kurazhkovskii et al., 2014; Channell and Lanci, 2014]. Совместный анализ данных палеонапряженности мезозоя-кайнозоя, выполненных по осадочным и термонамагниченным породам, не проводился.

В рамках настоящей работы проводится статистический анализ данных палеонапряженности и продолжительности полярных интервалов средней юры—палеогена.

#### 2. АНАЛИЗИРУЕМЫЙ МАТЕРИАЛ

2.1. Данные палеонапряженности по осадкам. Результаты определений палеонапряженности по осадочным породам взяты из работ [Куражковский и др., 2011; 2012; Kurazhkovskii et al., 2014]. Динамика палеонапряженности средней юры-палеогена, полученная в этих работах, не является непрерывной. Так, полностью отсутствуют данные палеонапряженности коньяка [Куражковский и др., 2012] и лютеция [Kurazhkovskii et al., 2014]. Пропуски палеомагнитной информации связаны с особенностями накопления осадочных толщ. На рисунке 1а представлены обобщенные данные, полученные на основе определений палеонапряженности по 853 горизонтам отложений юры-палеогена. Средние (за геологические эпохи) значения палеонапряженности по осадочным породам приведены в табл. 1. В дальнейшем при проведении статистического анализа мы разделили палеоген на две части: начало (палеоцен) и конец (эоцен, олигоцен). Такое разделение проведено в соответствии с особенностями поведения палеонапряженности. В начале палеогена обнаружены всплески палеонапряженности (высокие, более

Возраст	Осадочные породы				Термонамагниченные породы			
	п	$H/H_0$	σ	α95%	п	$H/H_0$	σ	α95%
Олигоцен	46	0.56	0.35	0.11	112	0.58	0.34	0.07
Эоцен	49	0.72	0.41	0.14	145	0.74	0.41	0.07
Палеоцен	92	0.81	0.77	0.16	131	0.83	0.53	0.09
Мел 2	159	0.82	0.58	0.09	229	0.73	0.48	0.06

Таблица 1. Средние за геологические эпохи значения палеонапряженности по осадочным и термонамагниченным породам

*Примечание*: n – количество палеомагнитных определений;  $H/H_0$  – средние значения палеонапряженности;  $\sigma$  – стандартное отклонение;  $\alpha$ 95% – 95% доверительные интервалы оценки среднего.

0.06

0.04

361

88

 $3H_0$  значения палеонапряженности, где  $H_0$  – среднее значение напряженности современного геомагнитного поля, равное 40 мкТл). Амплитуда всплесков составляла (3–7)  $\sigma$  (рис. 1 и табл. 1), где  $\sigma$  – дисперсия средних значений палеонапряженности за геологическую эпоху. В конце палеогена высокие значения палеонапряженности не обнаружены.

0.76

0.4

0.53

0.35

277

230

Мел 1

Юра 3, 2

Как видно из рис. 1*a*, изменения палеонапряженности происходили хаотически. Тем не менее, в ее изменениях можно обнаружить определенную структуру – чередование всплесков и интервалов спокойного геомагнитного поля, т. е. поведению палеонапряженности свойственна перемежаемость [Берже и др., 1991, Platt et al., 1993]. Наличие такой повторяемости в поведении геомагнитного поля позволяет надеяться на то, что пропуски данных не должны оказать значительного влияния на представления о поведении палеонапряженности средней юры—палеогена.

2.2. Данные палеонапряженности по термонамагниченным породам. Результаты определений палеонапряженности по термонамагниченным породам взяты из базы данных PINT12 [http://earth.liv.ac.uk/ pint/]. Описание базы данных приведено в работе [Biggin, et al., 2010]. На рисунке 16 показаны результаты этих определений палеонапряженности в интервале (168-23) млн лет. Кроме того, в табл. 1 приведены средние значения (за геологические эпохи) палеонапряженности, полученные по термонамагниченным породам. В настоящей работе использовано 1066 определений палеонапряженности по термонамагниченным породам. Следует отметить, что во многих случаях изотопные методы не позволяют различить возраст пород, используемых для палеомагнитных определений. Так, для интервала (168-23) млн. лет в PINT12 имеется только 164 результата определений палеонапряженности, возраст которых различается. Таким образом, полнота представления геомагнитной истории данными, полученными по термонамагниченным и по осадочным породам, безусловно, различается. Однако это различие не исключает возможности их сопоставления.

0.77

0.36

0.56

0.17

2.3. Сравнение палеонапряженности по осадочным и термонамагниченным породам. В поведении палеонапряженности, полученной по осадочным и термонамагниченным породам, имеются общие закономерности (рис. 1). Амплитуда вариаций палеонапряженности или разброс ее значений увеличиваются от юры к мелу и уменьшаются в среднем палеогене. Из таблицы 1 видно, что средние (за геологические эпохи) значения и дисперсии палеонапряженности, полученные по осадочным и термонамагниченным породам, изменяются одинаково. Это является доводом в пользу корректности полученных значений палеонапряженности. В то же время между этими массивами данных существует одно явное различие. По термонамагниченным породам получено меньше высоких ( $3H_0 - 4H_0$ ) значений палеонапряженности, чем по осадочным породам.

При исследовании изменений интенсивности геомагнитного поля мы рассматривали поведение палеонапряженности (H), а не виртуального дипольного магнитного момента (VDM). Это связано с несколькими причинами. Статистика распределений палеонапряженности, которая будет исследоваться ниже, во многом определяется наличием ее высоких значений. Высокие значения палеонапряженности получены как по осадочным, так и по термонамагниченным породам. Мы пока не знаем природу высоких значений (всплесков) палеонапряженности. Всплески – это региональное или глобальное явление? Соответственно, мы не знаем характер связи между всплесками палеонапряженности и поведением земного дипольного магнитного момента. Кроме того, как можно убедиться из анализа данных PINT12, средние за геологические эпохи значения  $H/H_0$ ,  $V/V_0$  ( $V_0$  – современный геомагнитный дипольный момент, равный  $8 \times 10^{22}$  Am<sup>2</sup>) и их дис-

0.06

0.04

персии с хорошей точностью совпадают. В связи с этим целесообразность и корректность перевода значений *H* в значения VDM нам представляется не очевидной.

2.4. Данные о продолжительности полярных интервалов. Для исследования распределений продолжительностей полярных интервалов нами использованы шкалы полярности, представленные в работах [Гужиков и др., 2007; Gradstein et al., 2008]. Использование двух шкал полярности было продиктовано следующими обстоятельствами. При обсуждении режима полярности мезозоя-кайнозоя важное место занимает такое явление, как меловой суперхрон. По современным представлениям меловой суперхрон был разделен эпизодами обратной полярности, т.е. не был монополярным. Вопрос о количестве и продолжительности интервалов обратной полярности в меловом суперхроне является дискуссионным. Согласно шкале [Gradstein et al., 2008] в меловом суперхроне имели место три эпизода обратной полярности геомагнитного поля. В работе [Гужиков и др., 2007] показано, что в меловом суперхроне было 7 продолжительных эпизодов обратной полярности. Меловой суперхрон по продолжительности значительно превосходит другие интервалы полярности. От того, как он разделен интервалами обратной полярности, зависит характер распределения продолжительностей полярных интервалов. Характер распределения продолжительностей полярных интервалов, во многом, определяет представления о процессах, связанных с генерацией геомагнитного поля. В связи с этим мы использовали шкалы полярности [Гужиков и др., 2007; Gradstein et al., 2008], которые максимально различаются в оценке количества эпизодов обратной полярности в меловом суперхроне.

2.5. Выбор аппроксимирующих функций. При анализе палеомагнитных данных для аппроксимации распределений палеонапряженности используются различные функции. Например, в работах [Biggin and Thomas, 2003; Heller et al., 2003] распределения палеонапряженности аппроксимировались нормальной, логнормальной и гамма функциями. Необходимо заметить, что выбор конкретных функций для аппроксимации эмпирических распределений, по обыкновению, не имеет теоретического обоснования. В связи с этим имеется широкий спектр возможностей подбора функций для описания полученных экспериментальных распределений. Альтернативой поиска возможных параметрических распределений служит подход, в котором используются "канонические" физические законы распределения [Sornette, 2000; Писаренко и Родкин, 2007]. К "каноническим" относят нормальное, экспоненциальное и степенное распределение. Как подчеркивается в [Sornette, 2000; Писаренко и Родкин, 2007], при таком подходе появляется возможность обнаружения аналогий с другими явлениями, а также физической интерпретации получаемых результатов. В том случае, если анализируемые данные достаточно хорошо описывается одним из "канонических" распределений, можно ограничиться рассмотрением только этого распределения. Особенностью настоящего исследования является использование данных, полученных по осадочным породам, и выбор вида функций, аппроксимирующих распределения палеонапряженности.

# 3. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПАЛЕОНАПРЯЖЕННОСТИ

3.1. Распределение палеонапряженности по осадочным породам. На рисунке 2а показано распределение значений палеонапряженности, соответствующее эпохам средней юры – палеогена. Из рисунка 2а видно, что модальные значения и амплитуда вариаций палеонапряженности (протяженность "хвостов") возрастали от юры к мелу. Данные палеонапряженности распределены не симметрично относительно модальных значений. Следовательно, они не соответствуют нормальному распределению. В правой части рис. 2 приведены аппроксимации накопленных распредепалеонапряженности лений (кумулятивных функций распределений палеонапряженности – *CDF*) степенной и экспоненциальной функциями (рис. 26). Здесь же представлены коэффициенты корреляции r<sub>power</sub> и r<sub>exp</sub> между данными палеонапряженности и аппроксимирующими функциями. Кроме того, даны показатели степенной функции –  $\alpha$  и экспоненциальной функции –  $\beta$ для каждого интервала геологического времени. Аппроксимация выполнялась в интервалах  $x > x_0$ , где  $x_0$  — модальное значение палеонапряженности. Как видно из рис. 26, значения палеонапряженности (в 5 распределениях из 6) наилучшим образом аппроксимируются степенной функцией. В связи с этим последующие заключения в основном будут строиться на результатах аппроксимации данных палеонапряженности степенной функцией. В то же время следует отметить, что CDF палеонапряженности конца палеогена (эоцена-олигоцена) лучше соответствует экспоненциальному распределению. На этом интервале высоких значений палеонапряженности (всплесков) не обнаружено.

Величина показателя степенной функции  $\alpha$ изменялась в зависимости от исследуемых интервалов геологического времени (рис. 26). Показатель  $\alpha$  имел максимальное значение при аппроксимации палеонапряженности мелового периода. По-видимому, значения показателя  $\alpha$  можно использовать в качестве одной из характеристик по-



**Рис. 2.** Распределения значений палеонапряженности по осадкам за геологические эпохи (юры–палеогена) (*a*), их аппроксимация степенными (сплошная линия) и экспоненциальными функциями (пунктир) (*б*). Кружками показана кумулятивная функция распределения палеонапряженности (*CDF*).  $r_{power}$  и  $r_{exp}$  – коэффициенты корреляции между экспериментальными данными и аппроксимирующими функциями. α и β – показатели степенной и экспоненциальной функций, соответственно.

ведения напряженности геомагнитного поля на исследованных интервалах геологического времени.

Вид функций, аппроксимирующих распределения палеонапряженности в средней юре-палеоцене и в эоцене-олигоцене, различается. Следовательно, на исследованном интервале геологического времени (168-23) млн лет наиболее значительные изменения в поведении палеонапряженности произошли вблизи границы раннего и среднего палеогена. Ранее изменение средних значений палеонапряженности вблизи границы палеоцен-эоцен было отмечено в работе [Солодовников, 1998]. В настоящей работе показано, что вблизи границы палеоцен-эоцен изменилась структура поведения палеонапряженности. Чередование всплесков и спокойного поведения палеонапряженности обнаружено только в юре-палеоцене.

3.2. Распределение палеонапряженности по термонамагниченным породам. На рисунке За показано распределение значений палеонапряженности средней юры-палеогена по термонамагниченным породам из PINT12. По аналогии с рис. 2 в правой части рис. 3 приведены накопленные распределения палеонапряженности (кумулятивные функции – CDF) и их аппроксимация степенной и экспоненциальной функциями (рис. 36). Из гистограмм (рис. 3а) следует, что модальные значения и амплитуда вариаций палеонапряженности возрастали от юры к мелу и палеогену. Наиболее протяженные "хвосты" в распределениях палеонапряженности отмечаются в мелу и в начале палеогена. Таким образом, гистограммы распределений значений палеонапряженности по осадкам и по термонамагниченным породам во многом совпадают (рис. 2*a*, 3*a*).

Аппроксимации кумулятивных функций палеонапряженности по термонамагниченным (рис. 3б) и по осадочным (рис. 2б) породам имеют некоторые различия. Так, данные по термонамагниченным породам несколько лучше аппроксимируются экспоненциальной, чем степенной функцией. При этом коэффициенты корреляции, соответствующие аппроксимации распределений палеонапряженности юры-палеоцена степенными и экспоненциальными функциями, достаточно высоки. Распределение данных палеонапряженности эоцена-олигоцена, безусловно, наилучшим образом аппроксимируется экспоненциальной функцией. Таким образом, данные, полученные как по термонамагниченным, так и осадочным породам свидетельствуют о том, что вблизи границы палеоцен-эоцен произошли изменения в поведении палеонапряженности. Как видно из рис. 2, 3, показатели степенных распределений палеонапряженности, полученных по осадочным и термонамагниченным породам, различаются. Чтобы понять причины этих различий (недостаточное для корректного анализа количество данных или некорректное определение палеонапряженности по одному из массивов данных) мы провели исследование изменений CDF в соответствии с геологическими периодами.

Аппроксимация распределений палеонапряженности, разделенных по геологическим периодам, проведена по аналогии с данными на рис. 26, 36. Результаты этой аппроксимации представлены в табл. 2 и на рис. 4. Как видно из рис. 4 и табл. 2, динамика  $\alpha$ , полученная по осадочным породам, качественно не изменяется в зависимости от подробности представления геомагнитной истории. Так, при разбиении геомагнитной истории как в соответствии с геологическими эпохами, так и с геологическими периодами максимальное значение  $\alpha$  получено при аппроксимации палеонапряженности мела.

Динамика,  $\alpha$  полученная по термонамагниченным породам, различается в зависимости от подробности разбиения палеомагнитной истории. При разбиении геомагнитной истории в соответствии с геологическими периодами максимальные значения параметра  $\alpha$  соответствуют меловому периоду. При более детальном разбиении геомагнитной истории, эпохам мелового периода соответствуют минимальные значения  $\alpha$ . Таким образом, поведение  $\alpha$ , полученное по термонамагниченным породам, оказалось зависимым от детальности представления геомагнитной истории. По нашему мнению это связано с недостаточным количеством данных, полученных по термонамагниченным породам.

# 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПОЛЯРНЫХ ИНТЕРВАЛОВ

На рисунке 5а приведено распределение длительностей интервалов между инверсиями геомагнитного поля (полярных интервалов) в мелу и их аппроксимация степенной и экспоненциальной функциями по данным шкалы полярности [Gradstein et al., 2008]. Как видно из рис. 5a, эти данные наилучшим образом аппроксимируются степенной функцией. Надо отметить, что ранее аналогичный результат был получен в работах [Клайн и др., 2009; Mori et al., 2011]. Если использовать шкалу [Гужиков и др., 2007] (в которой режим полярности мела получен с большей детальностью), то распределение продолжительностей полярных интервалов мела может аппроксимируется как степенной, так и экспоненциальной функцией (рис. 56). Таким образом, при детализации шкал полярности аппроксимация распределения длительностей полярных интервалов стремится от степенной к экспоненциальной функции.

На рисунке 6 показана динамика продолжительностей полярных интервалов и показателя β в



**Рис. 3.** Распределения значений палеонапряженности за геологические эпохи юры–палеогена из PINT12 (*a*), их аппроксимация степенными (сплошная линия) и экспоненциальными функциями (пунктир) (*б*). Кружками показана кумулятивная функция распределения палеонапряженности (*CDF*). *r*<sub>power</sub> и *r*<sub>exp</sub> – коэффициенты корреляции между экспериментальными данными и аппроксимирующими функциями. α и β – показатели степенной и экспоненциальной функциями, соответственно.

Геологические периоды	Осадочные породы	Термонамагниченные породы
Палеоген	$\alpha = 2.26, r_{power} = 0.99$ $\beta = 0.96, r_{exp} = 0.90$	$\alpha = 3.54, r_{power} = 0.97$ $\beta = 2.14, r_{exp} = 0.97$
Мел	$\alpha = 3.20, r_{power} = 0.98$ $\beta = 1.58, r_{exp} = 0.98$	$\alpha = 3.65, r_{power} = 0.92$ $\beta = 1.85, r_{exp} = 0.98$
Юра	$\alpha = 2.40, r_{power} = 0.96$ $\beta = 1.63, r_{exp} = 0.85$	$\alpha = 3.17, r_{power} = 0.97$ $\beta = 5.23, r_{exp} = 0.98$

Таблица 2. Значения показателей степенной (α) и экспоненциальной (β) функций, аппроксимирующих распределения палеонапряженности по осадочным и термонамагниченным породам

последние 200 млн лет, полученная в соответствии со шкалой [Gradstein et al., 2008]. Показатели  $\beta$  рассчитывались для временны́х интервалов продолжительностью по 10 млн. лет. Как видно из рис. 66, показатель  $\beta$  изменялся с течением геологического времени. Динамика  $\beta$  отражает качественные изменения режима полярности геомагнитного поля и может использоваться для структуризации шкалы полярности. Попытки структуризации магнитостратиграфической шкалы на основе концепции о смене трех основных состояний геомагнитного поля (преимущественно прямой полярности, преимущественно обратной полярности и пере-



Рис. 4. Динамика показателя степени  $\alpha$  по осадочным породам (сплошная линия) и термонамагниченным породам (пунктирная линия). Показатель  $\alpha$  за геологические периоды и геологические эпохи показан, соответственно большими и маленькими кружками.

менной полярности) уже предпринимались, например [Храмов и др., 1982; Молостовский и др., 2007]. В соответствии с этими тремя состояниями геомагнитного поля, геомагнитная история разбивалась на гиперхроны — интервалы продолжительностью несколько десятков миллионов лет [Молостовский и др., 2007]. Из рис. 66 видно, что наиболее резкие изменения показателя  $\beta$  совпадают с границами гиперхронов. Поведение  $\beta$  является одной из характеристик режима полярности геомагнитного поля. При этом изменения  $\beta$ позволяют обнаружить изменения режима полярности как при смене гиперхронов, так и внутри гиперхронов.

По мере накопления данных вид и показатели функций, которыми аппроксимируются распределения значений палеонапряженности и продолжительностей полярных интервалов могут изменяться. Рассмотренные материалы позволяют отметить тенденции изменений, которые происходят по мере накопления данных. Аппроксимации распределений значений палеонапряженности стремятся степенному, а продолжительностей полярных интервалов экспоненциальному закону.

### 5. ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из рисунков 2, 3, 5 и табл. 2 данные палеонапряженности и продолжительности полярных интервалов могут аппроксимироваться как степенной, так и экспоненциальной функциями. Мы не пытались в полной мере обосновывать выбор, сделанный в пользу степенного, либо экспоненциального распределения. В контексте настоящей публикации нас, прежде всего, интересовал не вид аппроксимирующей функции, а динамика ее показателей. При любом выборе аппроксимирующей функции ее показатель изменялся в зависимости от интервалов геологического времени (рис. 2, 3, 5; табл. 2). Следовательно, делать вывод о том, что в поведении палеонапряженности и режима полярности происходили качественные изменения можно как на основе ди-



**Рис. 5.** Распределения продолжительностей полярных интервалов мела и их аппроксимация степенными (сплошная линия) и экспоненциальными функциями (пунктир) согласно шкалам [Gradstein et al., 2008] (*a*) и [Гужиков и др., 2007] (*б*). Кружками показана кумулятивная функция распределения продолжительностей полярных интервалов (CDF). *r*<sub>power</sub> и *r*<sub>exp</sub> – коэффициенты корреляции между экспериментальными данными и аппроксимирующими функциями. α и β – показатели степенной и экспоненциальной функций, соответственно.

намики показателя степени, так и на основе динамики показателя экспоненты.

При обсуждении изменений поведения палеонапряженности следует обратить внимание на общую особенность поведения аппроксимирующих функций, полученных по осадочным и термонамагниченным породам. На интервале юра—начало палеогена анализируемые данные хорошо аппроксимируются степенной функцией (табл. 2). В конце палеогена данные по осадочным и термонамагниченным породам лучше аппроксимируются экспоненциальной функцией (рис. 2, 3). Таким образом, оба массива данных свидетельствуют, что вблизи границы палеоцен—эоцен произошли значимые изменения в поведении геомагнитного поля.

При обсуждении эволюционных изменений геомагнитного поля обычно сравнивают изменения средних значений и дисперсий палеонапря-



**Рис. 6.** Изменение продолжительности полярных интервалов  $\Delta t(a)$  и динамика показателя  $\beta$  в последние 200 млн лет согласно шкале [Gradstein et al., 2008] (*б*). Ниже оси абсцисс приведено разбиение шкалы полярности на гиперхроны согласно [Молостовский и др., 2007].

женности, либо частоты инверсий на различных интервалах геологического времени. В настоящей работе рассматривается еще один параметр, характеризующий работу геомагнитного динамо это α, либо β (показатели функций, которыми аппроксимируются распределения исследуемых палеомагнитных характеристик). Как видно из рассмотренных материалов, динамика средних значений палеонапряженности и динамика показателей аппроксимирующих функций могут не совпадать между собой. Таким образом, изменение средних значений и дисперсии палеонапряженности не отражают всех особенностей режима генерации геомагнитного поля. Изучение поведения α, либо β позволяет получить дополнительную информацию о процессах, происходящих в жидком земном ядре.

Результаты проведенного исследования позволили выявить следующие закономерности в поведении напряженности древнего геомагнитного поля: 1) изменения палеонапряженности происходили хаотически; 2) геологический интервал времени юра—начало палеогена характеризуется чередованием всплесков и спокойным режимом геомагнитного поля, что характерно для перемежающихся процессов [Берже и др., 1991, Platt et al., 1993]; 3) кумулятивные функции распределений значений палеонапряженности в данном временном интервале наилучшим образом аппроксимируются степенным законом; 4) показатели степенных функций изменяются в зависимости от геологического времени, т.е. имеют различную скейлинговую динамику. 5) различную скейлинговую динамику (в зависимости от интервалов геологического времени) имеет и режим полярности геомагнитного поля.

По нашему мнению, эти особенности поведения древнего геомагнитного поля являются отражением турбулентности процессов, происходящих в жидком ядре Земли. Теоретически роль турбулентных процессов в генерации геомагнитного поля обсуждалась в публикациях, посвященных работе геомагнитного динамо, например [Braginsky and Roberts, 1995; Соколов, 2004; Решетняк, 2008]. Обнаруженные нами закономерности основаны на фактическом материале и косвенно подтверждают влияние турбулентности на генерацию геомагнитного поля.

Кроме того, режим генерации геомагнитного поля в интервале юра-начало палеогена представляет собой перемежающийся процесс. Отличительной закономерностью перемежаемости является степенное распределение интенсивности выбросов (всплесков). Причем, показатель степени отражает состояние среды, в которой образуются всплески [Малинецкий и Потапов, 2000]. Известно, что перемежающиеся процессы тесно связаны с турбулентностью среды, в которой формируются всплесковые режимы [Шустер, 1988; Берже и др., 1991, Platt et al., 1993]. Проанализированные нами данные состоят из интервалов, имеющих различную скейлинговую динамику. Это указывает на изменение турбулентности в жидком ядре Земли с течением геологического времени. Показатель α может служить качественной характеристикой уровня турбулентности [Platt et al., 1993; John et al., 2002]. В соответствии с поведением  $\alpha$  можно сделать заключение, о том, что турбулентность в жидком ядре Земли возрастала от юры к мелу и уменьшалась в палеогене.

Статистический анализ характеристик древнего геомагнитного поля позволяет обнаружить сходство поведения главного геомагнитного поля с магнитосферными процессами. Так, в магнитосферных процессах распределения интервалов между выбросами (всплесками) обычно аппроксимируется экспоненциальной, а их амплитуда степенной функцией [Клайн и др., 2008]. Распределения значений палеонапряженности или амплитуды ее вариаций также наилучшим образом аппроксимируется степенной функцией.

#### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные материалы свидетельствуют, что в интервале (167-23) млн лет палеонапряженность представляет собой стохастический процесс. Тем не менее, в ее поведении можно выделить ряд особенностей, свойственных определенным интервалам геологического времени. Из анализа поведения палеонапряженности следует, что наиболее значительные качественные изменения в генерации геомагнитного поля произошли вблизи границы палеоцен-эоцен. В юре-палеоцене обнаружено чередование всплесков и спокойного геомагнитного поля. В спокойном состоянии вариации палеонапряженности происходили с малой амплитудой (порядка  $0.5H_0$ ). Поведению палеонапряженности в юре-палеоцене свойственна перемежаемость. В более поздние эпохи всплески палеонапряженности не обнаружены.

Поведение палеонапряженности свидетельствует о турбулентности среды, в которой происходила генерация геомагнитного поля. Турбулентность в жидком ядре Земли в меловом периоде, была выше, чем в юре и палеогене.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе / М.: Мир, 367 с. 1991.
- Богачкин А.Б. Палеомагнитная стратиграфия и петромагнетизм палеогеновых отложений Кавказа и Северного Прикаспия // Автореферат дис. канд. гео.-мин. наук. Саратов: Научно-исследовательский институт геологии Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского. 21 с. 2004.
- Гужиков А.Ю., Барабошкин 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 Е.М. Первушов. Саратов: изд-во Сарат. ун-та. 308 с. 2007.
- Добрецов Н.Л. Мантийные суперплюмы как причина главной геологической периодичности и глобальных перестроек // Докл. РАН. Т. 357. № 6. С. 797-800. 1997.
- Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А., Соколов Д.Д. Магнитные поля в астрофизике. Москва-Ижевск: РХД, 383 с. 2006.
- Иванов С.С. Мультифрактальные свойства и размерность аттрактора обращений геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 4. С. 149–156. 1996.
- Клайн Б.И., Куражковская Н.А., Куражковский А.Ю. Перемежаемость в волновых процессах // Физика Земли. № 10. С. 25–34. 2008.
- Клайн Б.И., Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А. Распределение длительностей полярных интервалов // Материалы семинара "Палеомагнетизм и магнетизм горных пород, теория, практика, эксперимент" / Ред. В.П.Щербаков. Ярославль: Издательство "Еще не поздно" ООО "Сервисный центр". 268 с. 2009.
- Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Клайн Б.И. Напряженность геомагнитного поля в среднейпоздней юре // Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии. Четвертое Всероссийское совещание. 26–30 сентября 2011 г. Санкт-Петербург. Научные материалы / Ред. В.А. Захаров. СПб: ООО изд-во "ЛЕМА", 276 с. 2011.
- Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А, Клайн Б.И., Брагин В.Ю. Вариации напряженности геомагнитного поля в меловом периоде // Геология и Геофизика. № 7. С. 930–939. 2012.
- Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. М.: Эдиториал УРСС, 335 с. 2000.
- Молостовский Э.А., Печерский Д.М., Фролов И.Ю.
  Магнитохроностратиграфическая шкала фанерозоя

и ее описание с помощью кумулятивной функции распределения // Физика Земли. № 10. С. 15–23. 2007.

- Печерский Д.М., Решетняк М.Ю., Соколов Д.Д. Фрактальный анализ временной шкалы геомагнитной полярности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 37. № 4. С. 132–142. 1997.
- 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 / Ред. В.Н. Староверов. Саратов: Издательский центр "Наука", 116 с. 2008.
- Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Распределения с тяжелыми хвостами: Приложения к анализу катастроф. М.: Геос, 236 с. 2007.
- Решетняк М.Ю. Некоторые спектральные свойства циклонической турбулентности в жидком ядре земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 3. С. 416–423. 2008.
- Рузмайкин А.А., Трубихин В.Л. Статистика инверсий геомагнитного поля за последние 80 млн лет // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 32. № 5. С. 170–175. 1992.
- Соколов Д.Д. Геодинамо и модели генерации геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44.
  № 5. С. 5791–589. 2004.
- Солодовников Г.М. Напряженность магнитного поля Земли в эоцене // Физика Земли. № 10. С. 84–88. 1998.
- 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. А.Н. Храмов. Л.: Недра, 312 с. 1982.
- Шустер Г. Детерминированный хаос. М.: Мир, 240 с. 1988.
- Biggin A.J., Thomas D.N. Analysis of long-term variations in the geomagnetic poloidal field intensity and evaluation of their relationship with global geodynamics // Geophys. J. Int. V. 152. P. 392–415. 2003.
- Biggin A.J., McCormack A., Roberts A. Paleointensity database updated and upgraded // EOS Trans. Am. geo-

phys. Un. V. 91. № 15, doi:10.1029/2010EO020003. 2010.

- Braginsky S.I., Roberts P.H. Equations governing convection in Earth's core and the geodynamo // Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics. V. 79. P. 1–97. 1995.
- Channell J.E.T., Lanci L. Oligocene-Miocenerelative (geomagnetic) paleointensity correlated from the equatorial Pacific (IODP Site U1334 andODP Site 1218) to the South Atlantic (ODP Site 1090) // Earth and Planetary Science Letters. V. 387 P. 77–88. 2014.
- Cox A. Lengths of geomagnetic polarity interval // J. Geophys. Res. V. 73. P. 3247–3260. 1968.
- 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.
- Heller R., Merrill R.T., McFadden P.L. The two states of paleomagnetic field intensities for the past 320 million years // Phys. Earth Planet. Inter. V. 135. P. 211–223. 2003.
- John T., Behn U., Stannarius R. Fundamental scaling low of on-off intermittency in a stochastically driven dissipative pattern-forming system // Phys. Rev. E. V. 65(4). 046229. 2002.
- Kurazhkovskii A.Yu., Kurazhkovskaya N.A., Klain B.I.
  Behavior of paleointensity during the Paleogene // Phys. Earth and Planet. Int. V. 229. P. 61–71. 2014.
- Mori N., Schmitt D., Ferriz-Mas A., Wicht J., Mouri H., Nakamichi A., Morikawa M. Domino model for geomagnetic field reversals // Physical Review E. V. 87. P. 012108. doi:10.1103/PhysRevE.87.012108. 2013.
- Platt N., Spiegel E.A., Tresser C. On-off intermittency: a mechanism for bursting // Phys. Rev. Lett. V. 70. P. 279–282. 1993.
- Sornette D. Critical Phenomena in Natural Sciences. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 528 p. 2006.
- Tarduno J., Cottrell R., Smirnov A. The paleomagnetism of single silicate crystals: Recording geomagnetic field strength during mixed polarity intervals, superchrons, and inner core growth // Reviews of Geophysics. V. 44: RG1002 (doi:10.1029/2005RG000189). 2006.
- Tauxe L., Yamazaki T. Paleointensities // Treatise on Geophysics. Geomagnetism. V. 5. P. 509–563. 2007.
- Valet J.-P. Time variations in geomagnetic intensity// Rev. Geophysics. V. 41(1), 1004. doi: 10.1029/2001/ RG000104. 2003.