

СПЕКТР КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ФАНЕРОЗОЕ

А.Ю. Куражковский, Н.А. Куражковская, Б.И. Клайн

*Геофизическая обсерватория «Борок», филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
152742, Ярославская обл., п. Борок, Россия*

Проведен поиск общих квазипериодичностей в поведении палеонапряженности и длительностей полярных интервалов геомагнитного поля. Данные палеонапряженности проанализированы в интервале 170 млн лет—современность. Поведение длительности полярных интервалов исследовано в течение всего фанерозоя (540 млн лет—современность). Обнаружено, что спектр основных вариаций палеонапряженности и длительностей полярных интервалов дискретен и включает квазипериодические колебания с характерными временами 15, 8, 5 и 3 млн лет. Характерные времена этих квазипериодических изменений геомагнитного поля в начале и в конце фанерозоя различались не более чем на 10 %. Спектральная плотность квазипериодических изменений геомагнитного поля циклически изменялась с течением геологического времени. Показана связь между поведением амплитуд вариаций палеонапряженности, длительностей полярных интервалов и их спектральной плотностью. Относительно высокую спектральную плотность квазипериодические вариации палеонапряженности (геомагнитной активности) имели в интервале 150—40 млн лет (мел—ранний палеоген). В это время возрастали амплитуды вариаций палеонапряженности и длительности полярных интервалов. В интервале 170—150 и 30 млн лет—современность квазипериодические изменения палеонапряженности практически не выделялись на фоне ее шумовых вариаций. При этом амплитуды вариаций палеонапряженности и длительности полярных интервалов уменьшались. В течение геомагнитной истории происходило чередование временных интервалов, в которых вариации палеонапряженности приобретали либо квазипериодический, либо шумовой характер.

Геомагнитные циклы, геодинамо, палеонапряженность, геомагнитная полярность, фанерозой

SPECTRUM OF QUASIPERIODIC VARIATIONS IN PALEOMAGNETIC ACTIVITY IN THE PHANEROZOIC

A.Yu. Kurazhkovskii, N.A. Kurazhkovskaya, B.I. Klain

Detection of common quasiperiodicities in the paleointensity behavior and lengths of polarity intervals of the Earth's magnetic field was carried out. The paleointensity data were analyzed in the 170 Ma–present day interval. Behavior of the lengths of geomagnetic polarity intervals was investigated within the interval spanning the entire Phanerozoic (540 Ma–present age). It was found that the spectrum of the main paleointensity variations and polarity interval lengths is discrete and includes quasiperiodic variations with characteristic times of 15, 8, 5, and 3 Ma. The characteristic times of these quasiperiodic variations in the geomagnetic field at the beginning and end of the Phanerozoic differed not more than 10%. The spectral density of quasiperiodic changes in the geomagnetic field changed cyclically over geological time. The connection between the behavior of the amplitudes of paleointensity variations, the lengths of geomagnetic polarity intervals, and their spectral density is shown. The spectral density of quasiperiodic paleointensity variations (geomagnetic activity) was relatively high in the 150–40 Ma interval (Cretaceous–early Paleogene). At this time, the amplitudes of paleointensity variations and the lengths of geomagnetic polarity intervals increased. Within the intervals spanning 170–150 Ma and 30 Ma–present age, the quasiperiodic variations of paleointensity were barely expressed against its background noise variations, while the amplitudes of paleointensity variations and the lengths of polarity intervals were decreasing. Alternations of the time intervals in which paleointensity variations acquired either a quasiperiodic or noise character took place during the evolution of the geomagnetic field.

Geomagnetic cycles, geodynamo, paleointensity, geomagnetic polarity, Phanerozoic

ВВЕДЕНИЕ

Заклучения о процессах, происходящих в ядре Земли, и механизме их связи с циклическими литосферными процессами в основном базируются на данных об особенностях изменений древнего геомагнитного поля [Храмов и др., 1982; Larson, Olson, 1991; Диденко, 2011; Hounslow et al., 2018; Добрецов и др., 2021]. Палеомагнитные данные свидетельствуют, что палеонапряженность (база данных PINT (2015.05) [Heller et al., 2003]) и длительности интервалов геомагнитной полярности [Gradstein et al.,

2008] циклически изменялись в течение геомагнитной истории. Вместе с тем сведения о спектре характерных времен и амплитудах изменений параметров, которые характеризуют геомагнитное поле, пока отрывочны и не систематизированы. Так, хорошо известны циклические изменения частоты геомагнитных инверсий [Храмов и др., 1982] и палеонапряженности [Большаков, Солодовников, 1981] с большими (около 200 млн лет) характерными временами. В этих геомагнитных циклах изменения палеонапряженности и частоты геомагнитных инверсий связаны между собой обратной зависимостью [Куражковский и др., 2010]. Аналогичный вывод о взаимосвязи между поведением палеонапряженности и частоты геомагнитных инверсий был сделан позднее в работе [Kulakov et al., 2019].

В работе [Mazaud et al., 1983] показано существование циклических изменений частоты геомагнитных инверсий в кайнозойе с характерными временами порядка 15 млн лет. Циклические изменения, свойственные как поведению палеонапряженности, так и частоте геомагнитных инверсий с характерными временами менее 100 млн лет пока остаются практически не исследованными.

Результаты определений напряженности геомагнитного поля по осадочным и термонамагнитным породам, полученные в последние годы, позволили продолжить исследования закономерностей изменений палеонапряженности. В настоящей работе на основе анализа различных массивов палеомагнитных данных проведен поиск общих квазипериодичностей, присущих изменениям напряженности и полярности геомагнитного поля.

АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

В этом исследовании мы использовали результаты определений палеонапряженности, полученные по морским и океанским отложениям, а также по термонамагнитным породам. Результаты определений палеонапряженности по осадочным породам взяты из работ [Oxneiser et al., 2013; Yamamoto et al., 2014; Yamazaki, Yamamoto, 2018; Куражковский и др., 2020]. Определения палеонапряженности по термонамагнитным работам взяты из базы данных PINT (2015.05) (<http://earth.liv.ac.uk/pint/>), описание которой приведено в работе [Biggin et al., 2010].

Результаты определений палеонапряженности по осадочным породам позволяют анализировать ее поведение в интервалах 8—0, 19.5—12,0, 42—23, 170—23 млн лет. Отложения, по которым определялась палеонапряженность в интервалах 42 млн лет—современность [Oxneiser et al., 2013; Yamamoto et al., 2014; Yamazaki, Yamamoto, 2018] и 167—23 млн лет [Куражковский и др., 2020], отбирались в разных регионах. Это позволяло сравнить результаты определений палеонапряженности в интервале 42—23 млн лет, которые получены по отложениям различных регионов. Данные палеонапряженности по осадочным породам были откалиброваны с помощью базы данных PINT (2015.05). Процедура калибровки данных палеонапряженности достаточно подробно изложена в работе [Kurazhkovskii et al., 2011].

Для анализа изменений длительностей полярных интервалов нами использовались геохронологическая шкала (Geologic Time Scale 2008-GTS 08) [Gradstein et al., 2008] и общая шкала геомагнитной полярности [Жамойда и др., 2000] с уточнениями в юрском и меловом интервалах, приведенными в работах [Гужиков и др., 2007; Пименов, Ямпольская, 2008]. Мы использовали эти шкалы геомагнитной полярности, чтобы оценить влияние подробности палеомагнитных данных на результаты изучения циклических изменений геомагнитной полярности. Исследование поведения геомагнитной полярности мы провели на основе данных о длительностях полярных интервалов. Такой подход не требует усреднения данных, и он точно отражает временное распределение геомагнитных инверсий, которое соответствует используемым шкалам геомагнитной полярности.

Согласно шкалам [Жамойда и др., 2000; Gradstein et al., 2008], средняя продолжительность полярных интервалов в фанерозое составляла около 400 тыс. лет. Это позволяло проводить поиск циклических изменений длительностей полярных интервалов с разрешением несколько миллионов лет. В настоящем исследовании мы попытались определить спектр циклических изменений длительностей полярных интервалов и палеонапряженности с разрешением до 2 млн лет.

Спектр квазипериодических изменений палеонапряженности исследовался с применением вейвлет-анализа [Астафьева, 1996]. Для этого кривая палеонапряженности, построенная по осадочным породам, была отсканирована и оцифрована с шагом 50 тыс. лет, который достаточен для разрешения вариаций с характерными временами от 500 тыс. лет и более. Эффективные алгоритмы вейвлет-анализа реализованы в пакете программ [MATLAB, 2018]. Ширина окна, в котором проводилась оценка спектральной плотности, пропорциональна временной длине вейвлета. Характеристики вейвлета определяются минимальным временным разрешением (шаг оцифровки) и длиной исследуемого ряда. Оптимальные значения параметров вейвлета вычислялись в программе [MATLAB, 2018] автоматически и использовались по умолчанию.

Кроме того, в данной работе для поиска скрытых квазипериодичностей в поведении палеонапряженности и длительности полярных интервалов использовался Фурье-анализ, метод которого изложен в работе

[Серебренников, Первозванский, 1965]. Для Фурье-анализа данных (палеонапряженности — H либо длительностей полярных интервалов — Δt), значения которых заданы не в равноотстоящих точках исследуемого интервала времени, аппроксимируем последовательность рядом

$$F(t) = \sum_{j=1}^N s_j \delta(t - t_j). \quad (1)$$

Здесь F — анализируемый ряд данных, характеризующих древнее геомагнитное поле, t_j — время, которому соответствует амплитуда s_j анализируемого ряда, N — общее число таких интервалов. Разложим функцию $F(t)$ в интеграл Фурье:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\omega} \exp(-i\omega t) \frac{d\omega}{2\pi}. \quad (2)$$

Из последнего выражения, учитывая (1), находим спектральную компоненту F_{ω}

$$F_{\omega} = \sum_{j=1}^N s_j \exp(i\omega t_j). \quad (3)$$

Формула (3) использовалась нами, для получения спектров исследуемых ниже рядов.

ЦИКЛИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАЛЕОНАПРЯЖЕННОСТИ

Результаты определений напряженности геомагнитного поля в интервале средняя юра—современность по осадочным (a) и термонамагнитным (b) породам приведены на рис. 1. Как видно, наиболее значимыми геомагнитными событиями, которые связаны с энергией геомагнитного поля, являлись

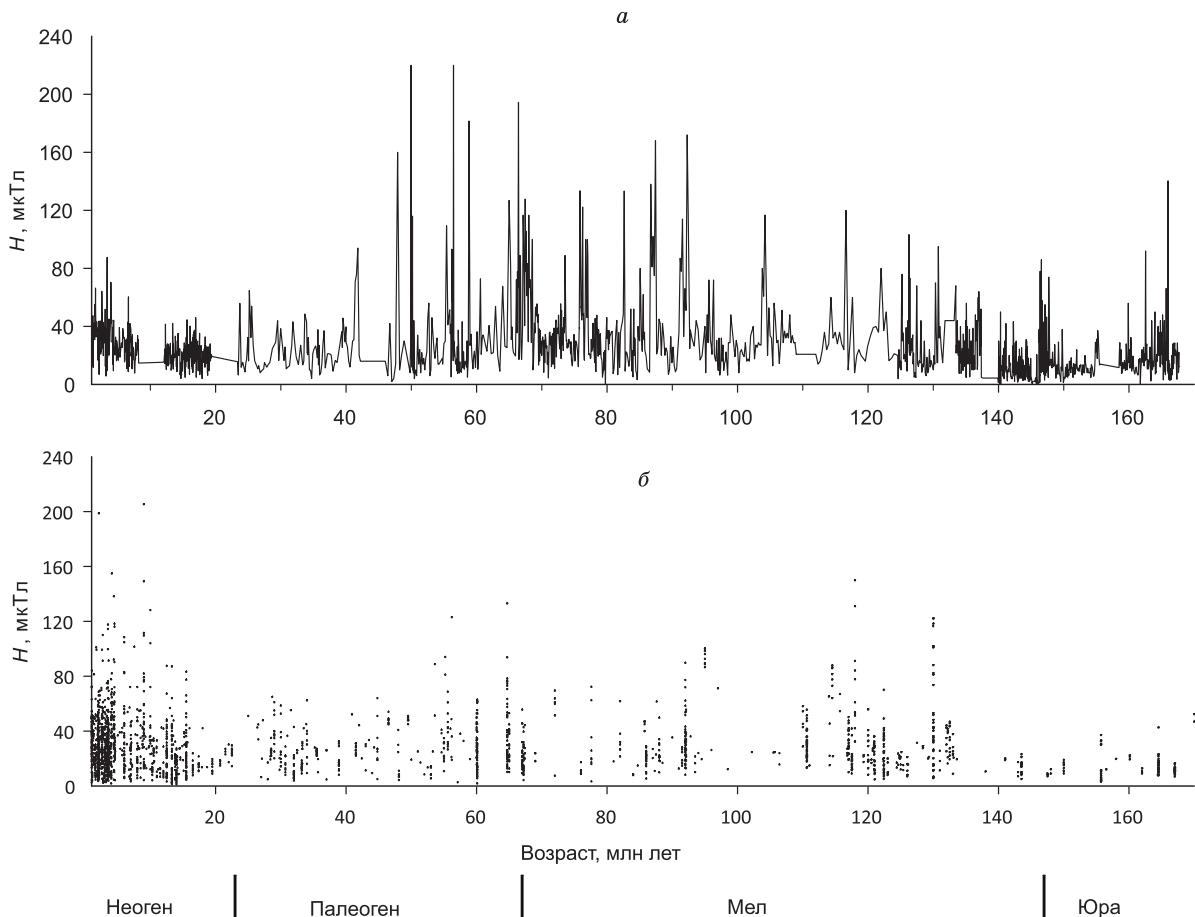


Рис. 1. Поведение палеонапряженности (H) в последние 170 млн лет:

a — по осадочным [Oxneiser et al., 2013; Yamazaki, Yamamoto, 2018; Куражковский и др., 2020], b — по термонамагнитным породам из базы данных PINT (2015.05).

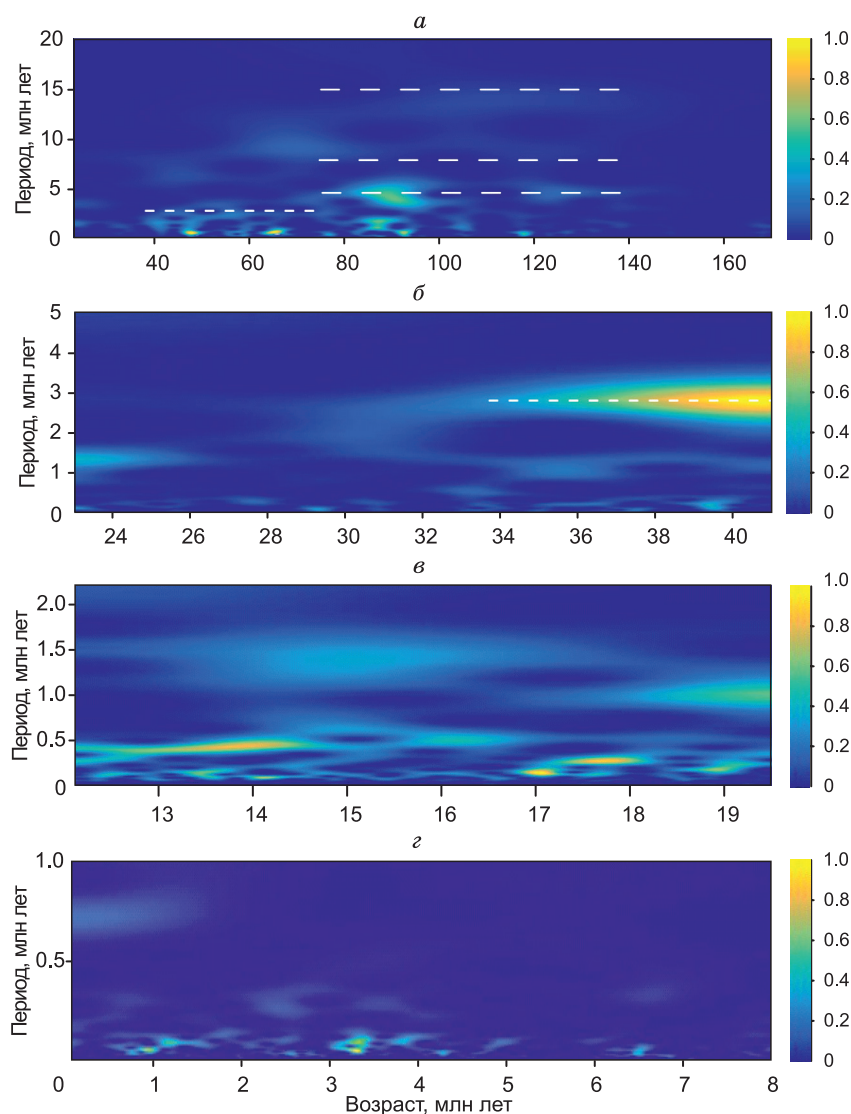


Рис. 2. Вейвлет-диаграмма изменений палеонапряженности по осадочным породам в интервалах:

a — 167—23 млн лет [Куражковский и др., 2020], *б* — 42—23 млн лет [Yamamoto et al., 2014], *в* — 19.5—12.0 млн лет [Oxneiser et al., 2013], *г* — 8 млн лет—современность [Yamazaki, Yamamoto, 2018]. Штриховыми линиями показаны обсуждаемые квазипериодичности изменений палеонапряженности. Спектральная плотность на цветовых шкалах дана в относительных единицах.

кратковременные (всплесковые) повышения палеонапряженности. Во время всплесков палеонапряженность в несколько раз возрастала по сравнению со своим средним значением (29 мкТл в интервале 170—23 млн лет). Для поведения палеонапряженности характерно чередование коротких серий всплесков палеонапряженности с интервалами относительно спокойного геомагнитного поля. Подобные изменения геомагнитного поля мы рассматриваем как циклы палеонапряженности или геомагнитной активности. В этих циклах амплитуды всплесков палеонапряженности изменялись с течением геологического времени. Максимальные амплитуды всплески палеонапряженности имели в мелу—раннем палеогене. После рубежа 40 млн лет (см. рис. 1) амплитуды всплесков палеонапряженности уменьшились.

На рисунке 2 показаны вейвлет-диаграммы вариаций палеонапряженности на интервале 170—современность. Как видно из результатов вейвлет-анализа (см. рис. 2, *a*), спектральный состав вариаций палеонапряженности изменялся с течением геологического времени. Так, в юре (170—150 млн лет) в спектре вариаций палеонапряженности не обнаруживаются явных периодичностей. В мелу—начале палеогена спектр изменений палеонапряженности становится дискретным и в нем проявляются квазипериодичности с характерными временами порядка 15, 8—10, 5, 3 и 1 млн лет. В палеогене ширина спектра квазипериодических изменений палеонапряженности уменьшалась. В интервале 42—23 млн лет характерные времена квазипериодических изменений палеонапряженности составляли 3 и 1 млн лет

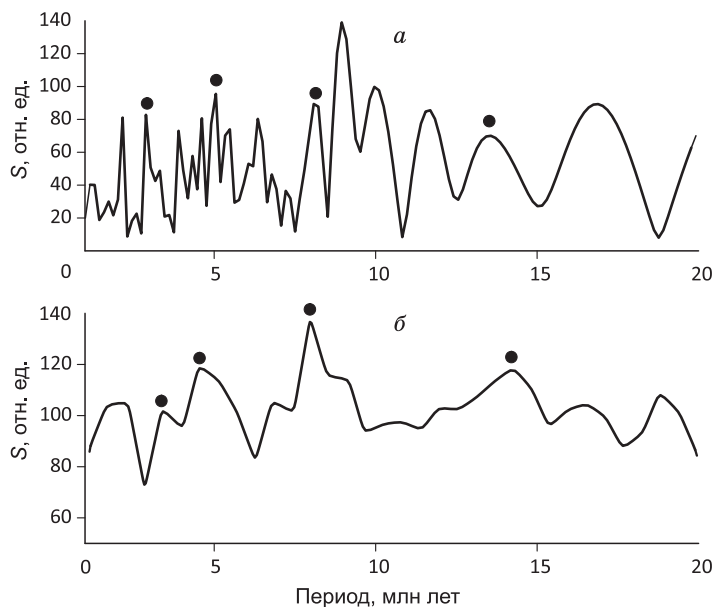


Рис. 3. Спектр квазипериодических изменений палеонапряженности, полученный в результате Фурье-анализа данных:

a — по осадочным [Куражковский и др., 2020], *б* — по термонамагнитным породам из PINT (2015.05). *S* — спектральная плотность. Точками показаны обсуждаемые квазипериодичности в поведении палеонапряженности.

(см. рис. 2, *a*, *б*). При этом вариации палеонапряженности с характерными временами более 2 млн лет прекратились после рубежа 30 млн лет (см. рис. 2, *б*, *в*, *г*).

По результатам Фурье-анализа (рис. 3, *a*) в интервале 170—23 млн лет максимумы спектральной плотности соответствовали изменениям палеонапряженности с характерными временами 5 и 8 млн лет. Аналогичные максимумы в спектре измене-

ний палеонапряженности получены по термонамагнитным породам PINT (2015.05) (см. рис. 3, *б*).

Как видно из результатов вейвлет-анализа (см. рис. 2), временные интервалы, в которых вариации палеонапряженности имели либо квазипериодический, либо шумовой характер, чередовались. Спектр вариаций палеонапряженности был дискретным в мелу и начале палеогена (см. рис. 2, *a*). Для определения спектра изменений палеонапряженности в более удаленные интервалы геологического времени пока мало палеомагнитных данных. Тем не менее в работе [Куражковский и др., 2020] было показано, что всплески палеонапряженности и связанные с ними циклические изменения с характерными временами несколько миллионов лет имели место в перми—начале триаса. Это дает основание для предположения, что в перми (270—250 млн лет) спектр изменений палеонапряженности также был дискретным. Хаотичность изменений палеонапряженности отмечена в юре и в неогене. Таким образом, в ходе геомагнитной истории чередовались временные интервалы, в которых изменения палеонапряженности имели либо квазипериодический, либо хаотический характер. Имеющиеся материалы дают основание для вывода, что перемежаемость интервалов с квазипериодическими и хаотическими изменениями палеонапряженности — это циклический процесс. Его характерные времена, по нашим оценкам, близки к длительностям известных циклов изменений частоты геомагнитных инверсий в фанерозое (около 200 млн лет).

Нами обнаружены два вида циклических изменений палеонапряженности: циклические изменения ее величины и циклы, в ходе которых изменялась структура ее вариаций. В спектре изменений палеонапряженности присутствуют квазипериодичности с характерными временами около 15, 8, 5 и 3 млн лет. Изменения палеонапряженности отражают изменения энергии геомагнитного поля. В связи с этим мы рассматриваем циклы изменений палеонапряженности как циклы геомагнитной активности. Наиболее значительные изменения геомагнитной активности происходили в циклах с характерными временами порядка 5 и 8 млн лет (рис. 2, *a*; 3, *a*, *б*). Возрастания либо уменьшения длительностей геомагнитных циклов сопровождалось уменьшениями их спектральной плотности. Оценки циклов геомагнитной активности, сделанные по термонамагнитным (см. рис. 3, *б*) и осадочным породам (см. рис. 3, *a*), с погрешностью порядка 1 млн лет совпадали между собой.

Наиболее значимые изменения структуры вариаций палеонапряженности произошли вблизи рубежей 150 и 30 млн лет. До рубежа 150 млн лет квазипериодичности в спектре изменений палеонапряженности не обнаруживались. В интервале 150—30 млн лет в поведении палеонапряженности проявился ряд квазипериодичностей с характерными временами от 15 до 3 млн лет. После рубежа 30 млн лет квазипериодические изменения палеонапряженности с характерными временами более 2 млн лет прекратились.

ИЗМЕНЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТЕЙ ПОЛЯРНЫХ ИНТЕРВАЛОВ

На рисунке 4 показана динамика изменений длительностей полярных интервалов в конце фанерозоя (последние 170 млн лет) и течение всего фанерозоя (540 млн лет—современность). В зависимости от подробности используемых данных распределения длительностей полярных интервалов в последние

170 млн лет несколько различаются (см. рис. 4, *а*, *б*). Также следует отметить различную подробность (см. рис. 4, *в*) исследования режима геомагнитной полярности в начале (540—170 млн лет) и в конце фанерозоя (170 млн лет—современность). Разделение фанерозоя на две неравные части определялось различиями в подробности палеомагнитных данных в этих интервалах геологического времени.

Согласно всем анализируемым данным, наиболее значимыми событиями в поведении геомагнитной полярности были продолжительные полярные интервалы с характерными временами более 1 млн лет. В интервале 150—30 млн лет в поведении режима полярности визуально обнаруживается цикличность (см. рис. 4, *а*, *б*). Эта цикличность определяется перемежаемостью продолжительных геомагнитных интервалов сериями коротких интервалов геомагнитной полярности.

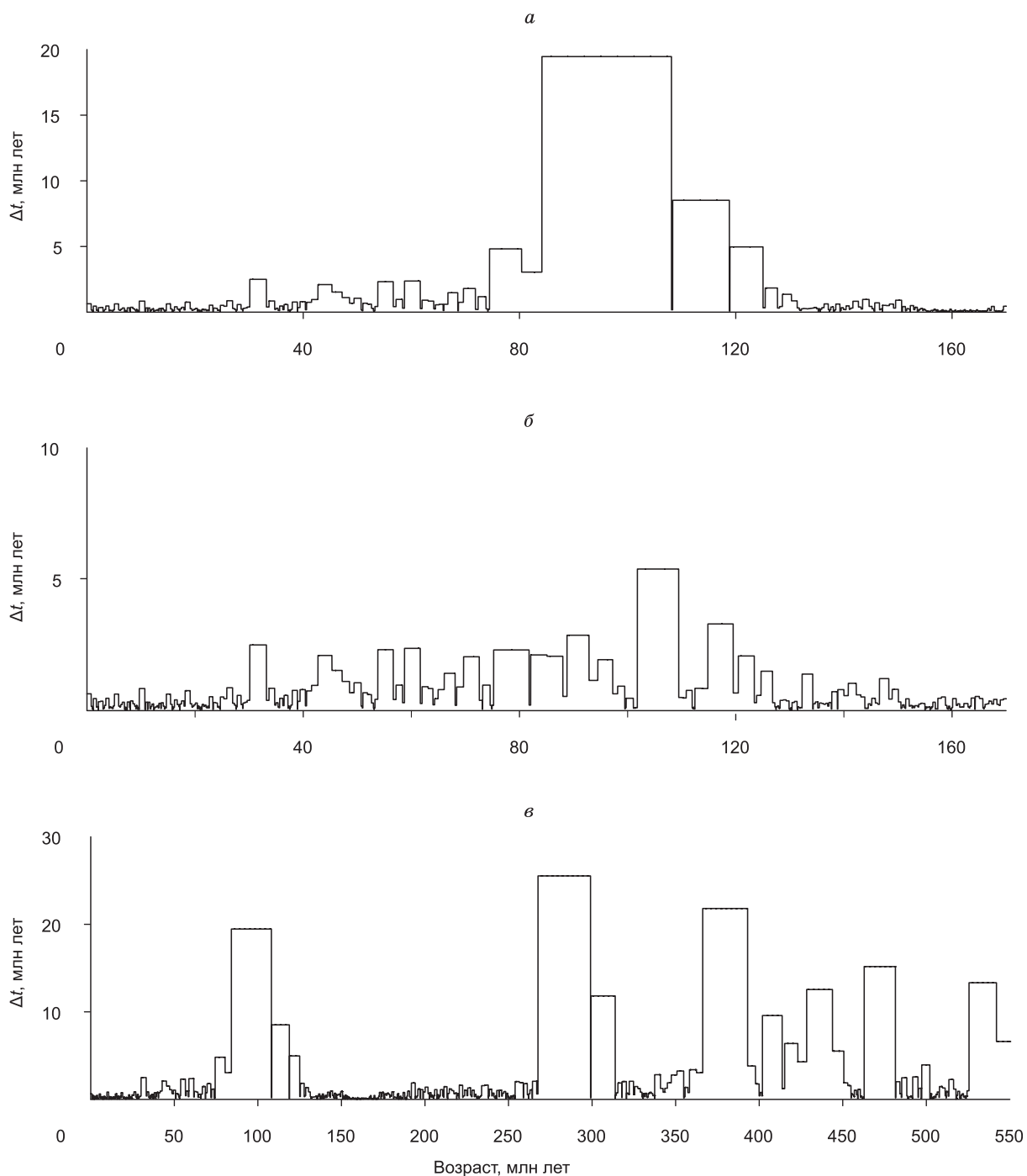


Рис. 4. Изменения длительностей полярных интервалов (Δt) в последние 170 млн лет:

а — из [Gradstein et al., 2008], *б* — из [Жамойда и др., 2000; Гужиков и др., 2007], *в* — в интервале 540 млн лет—современность, по [Gradstein et al., 2008].

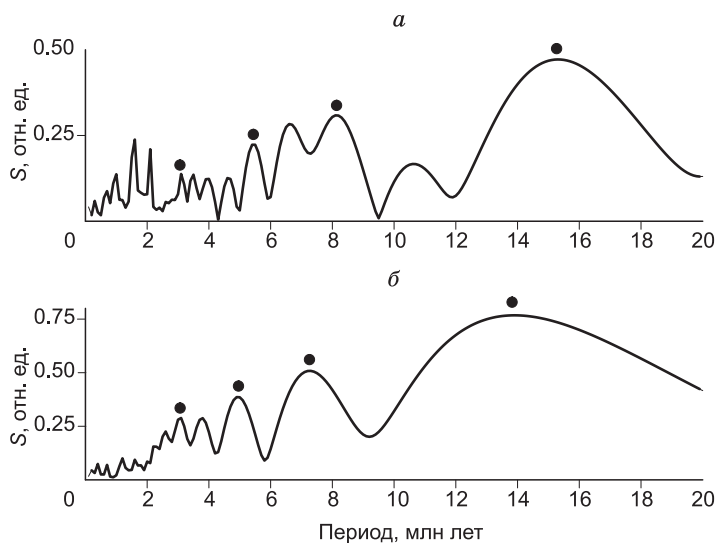


Рис. 5. Спектр длительностей полярных интервалов.

а — в начале (540—170 млн лет), *б* — в конце (170 млн лет—современность) фанерозоя. *S* — спектральная плотность. Точками обозначены обсуждаемые квазипериодичности в поведении длительностей полярных интервалов.

должительные интервалы геомагнитной полярности были в интервале 125—75 млн лет.

При частых инверсиях геомагнитного поля (170—150 млн лет) в поведении геомагнитной полярности цикличность не обнаруживается. Во многом это может быть связано с наличием зон аномальной полярности [Пименов, Ямпольская, 2008], в которых сложно определить как длительности отдельных полярных интервалов, так и их количество. Таким образом, циклические изменения длительностей полярных интервалов визуально обнаруживались после рубежа 150 млн лет, а также ранее рубежа 170 млн лет (см. рис. 4, *в*) и не обнаруживались между 170—150 млн лет (в конце средней—начале поздней юры). В геомагнитной истории происходило чередование временных интервалов, в которых цикличность в поведении режима геомагнитной полярности либо обнаруживалась, либо не обнаруживалась.

Фурье-анализ шкалы [Gradstein et al., 2008] (рис. 5, *а, б*) показал, что поведению длительностей полярных интервалов свойственны квазипериодические изменения с характерными временами около 3, 5, 8 и 15 млн лет. Эти квазипериодические изменения длительностей полярных интервалов в начале (540—170 млн лет) и в конце (170 млн лет—современность) фанерозоя в среднем различались на 10 % и составляли соответственно (5.5, 8 и 15 млн лет) и (5, 7 и 14 млн лет). Детальность реконструкции режима геомагнитных инверсий в начале и в конце фанерозоя существенно различается. В данных о поведении полярности геомагнитного поля в начале фанерозоя имеются пробелы. Сопоставление результатов реконструкции режима геомагнитной полярности в начале и в конце фанерозоя показало, что пропуски палеомагнитных данных в [Gradstein et al., 2008] практически не влияют на оценки длительностей геомагнитных циклов.

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ ПАЛЕОНАПРЯЖЕННОСТИ И ДЛИТЕЛЬНОСТЕЙ ПОЛЯРНЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Как видно из рисунков 2 и 5, в спектрах изменений палеонапряженности и длительностей интервалов геомагнитной полярности присутствуют одинаковые квазипериодичности с характерными временами 15, 8, 5 и 3 млн лет. Кроме того, амплитуды вариаций палеонапряженности и длительностей полярных интервалов возрастали, если вариации геомагнитной активности были квазипериодическими, а их спектр дискретным, например, в интервале 150—30 млн лет. Изменения палеонапряженности и длительностей полярных интервалов были хаотическими в интервале 170—150 млн лет. В это время уменьшались как средние значения амплитуд вариаций палеонапряженности, так и средние длительности полярных интервалов. Поведению палеонапряженности и длительностей полярных интервалов свойственны два вида циклических изменений: 1) циклические изменения величины палеонапряженности и длительностей полярных интервалов (с характерными временами 3—15 млн лет) и 2) циклические изменения их спектрального состава (по нашим оценкам, этот процесс имеет характерные времена порядка 200 млн лет).

Следует отметить, что между поведением палеонапряженности и длительностей полярных интервалов обнаруживаются некоторые различия. Нет явной связи между амплитудами всплесков палеонапряженности с длительностями полярных интервалов, в которых эти всплески происходили. Всплески палеонапряженности могли возникать как в ходе относительно коротких, так и продолжительных интервалов геомагнитной полярности (см. рис. 1 и 4).

В динамике изменений амплитуд всплесков палеонапряженности и длительностей полярных интервалов обнаруживаются некоторые различия. Максимальные амплитуды всплесков палеонапряженности были в начале палеогена, а самые продолжительные полярные интервалы в середине мела. Уменьшение амплитуд вариаций палеонапряженности в палеогене началось несколько раньше, чем уменьшение длительностей полярных интервалов вблизи рубежей 55 и 30 млн лет соответственно. Из данных [Oxhneiser et al., 2013; Yamamoto et al., 2014; Yamazaki, Yamamoto, 2018], следует, что ранее рубежа 30 млн лет в поведении палеонапряженности обнаруживаются вариации с характерными временами, превышающими длительности отдельных полярных интервалов. После рубежа 30 млн лет характерные времена вариаций палеонапряженности либо точно совпадали с продолжительностями полярных интервалов, либо были короче, чем интервалы геомагнитной полярности. Такое соответствие между вариациями палеонапряженности и длительностями полярных интервалов продолжалось от рубежа 30 млн лет до современности.

Обнаружение одинаковых циклическостей в поведении палеонапряженности и геомагнитной полярности позволяет на равных основаниях использовать данные об этих параметрах древнего геомагнитного поля для заключений о длительностях палеогеомагнитных циклов. При этом только данные палеонапряженности дают возможность характеризовать амплитуды изменений активности геомагнитных процессов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Нами проанализированы три различных массива палеомагнитных данных: шкала геомагнитной полярности, а также данные палеонапряженности, полученные по термонамагнитным и осадочным породам. Оценки длительностей геомагнитных циклов (15, 8, 5 и 3 млн лет), полученные по этим массивам палеомагнитных данных, практически совпадают между собой. Такое совпадение оценок длительностей геомагнитных циклов свидетельствует, что все эти массивы палеомагнитных данных с погрешностью порядка 1 млн лет адекватно отражают динамику изменений древнего геомагнитного поля. Таким образом, все современные палеомагнитные данные позволяют определять циклические изменения геомагнитного поля с разрешением до 3 млн лет. При этом непосредственно состояние геомагнитной активности определяется только поведением палеонапряженности. Оценки спектра квазипериодических изменений палеонапряженности практически не зависят от регионов, в которых отбирались образцы для ее определений. Например, в интервале 42—23 млн лет палеонапряженность исследовалась по отложениям, которые образовались в различных регионах и отбирались с различной подробностью [Yamamoto et al., 2014; Куражковский и др., 2020]. При этом оценки квазипериодических изменений палеонапряженности, сделанные по этим данным, совпадают (см. рис. 2, а, б).

Проведенное исследование показало, что генерация геомагнитного поля — это сложный процесс, в ходе которого изменялась как интенсивность, так и спектральный состав вариаций напряженности геомагнитного поля. Традиционно предполагается, что факторами, влияющими на работу геодинамо, являются: 1) глубинные тепловые процессы, например, динамика теплообмена между ядром и мантией и 2) внешние процессы, в ходе которых изменялась скорость осевого вращения нашей планеты [Брагинский, 1970]. Длительности геомагнитных циклов, в ходе которых значения палеонапряженности изменялись в несколько раз, составляли 3—8 млн лет. Относительные изменения интенсивности тепловых [Сорохтин и др., 2010] и ротационных [Киселев, 2015] процессов за такие интервалы геологического времени были малы по сравнению с изменениями палеонапряженности. Это свидетельствует о том, что между факторами, гипотетически влияющими на генерацию геомагнитного поля, и циклическими изменениями его интенсивности нет определенной связи. В работе [Решетняк, 2020] ранее обсуждалась возможность влияния перераспределения энергии геомагнитного поля внутри спектра его вариаций на поведение главного геомагнитного поля. Характер связи между спектральным составом вариаций палеонапряженности и их амплитудами мы показали на основе анализа палеомагнитных данных.

Некоторое различие в оценке спектральных максимумов в начале (5,5, 8 и 15 млн лет) и в конце (5, 7 и 14 млн лет) фанерозоя может быть связано как с эволюционными изменениями среды, в которой происходила генерация геомагнитного поля, так и с пропусками палеомагнитных данных. Поскольку обнаруженные изменения длительностей геомагнитных циклов незначительны, есть основание для предположения, что физические свойства среды, в которой происходила генерация геомагнитного поля в течение фанерозоя, также изменились незначительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В спектрах изменений палеонапряженности и длительностей полярных интервалов обнаружены одинаковые циклическости (квазипериодичности) с характерными временами 15, 8, 5 и 3 млн лет. В течение фанерозоя (последние 540 млн лет) характерные времена геомагнитных циклов изменились незна-

чительно. При этом спектральная плотность квазипериодических вариаций палеонапряженности изменялась с течением геологического времени. Высокую спектральную плотность квазипериодические вариации палеонапряженности (геомагнитной активности) имели в интервале 150—40 млн лет (в мелу—раннем палеогене). В этом интервале возрастали амплитуды изменений палеонапряженности и длительности полярных интервалов. В юре и неогене (170—150 и 30 млн лет—современность) квазипериодические изменения палеонапряженности практически не выделялись на фоне ее шумовых вариаций. В течение геомагнитной истории происходило чередование временных интервалов, в которых вариации палеонапряженности приобретали либо квазипериодический, либо шумовой характер.

ЛИТЕРАТУРА

Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // УФН, 1996, т. 166, № 11, с. 1145—1170, <https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199611a.1145>.

Большаков А.С., Солодовников Г.М. Напряженность геомагнитного поля в последние 400 миллионов лет // Докл. АН СССР, 1981, т. 260, № 6, с. 1340—1343.

Брагинский С.И. О спектре колебаний гидромагнитного динамо Земли // Геомагнетизм и аэронаука, 1970, т. 10, № 2, с. 221—233.

Диденко А.Н. О возможной причине квазипериодических колебаний частоты геомагнитных инверсий и величины $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в морских карбонатных породах в фанерозое // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (12), с. 1945—1956.

Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В., Василевский А.Н. Характерные свойства магнитного и гравитационного полей Земли, взаимосвязанные с глобальной и региональной тектоникой // Геология и геофизика, 2021, т. 62 (1), с. 10—30, doi: 10.15372/GiG2020181.

Жамойда А.И., Ковалевский О.П., Корень Т.Н., Маргулис Л.С., Предтеченский Н.П., Рублев А.Г., Семихватов М.А., Храмов А.Н., Шкагова В.К. Дополнения к Стратиграфическому кодексу России. СПб, Изд-во ВСЕГЕИ, 2000, 112 с.

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 Саратов. ун-та, 2007, с. 69—86.

Киселев В.М. Вращение Земли от архея до наших дней. Красноярск, Сиб. федер. ун-т, 2015, 262 с.

Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Клайн Б.И., Брагин В.Ю. Геомагнитное поле в геологическом прошлом (за последние 400 млн лет) // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (4), с. 486—495.

Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Клайн Б.И. Всплески палеонапряженности в истории геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэронаука, 2020, т. 60, № 6, с. 809—816, doi: 10.31857/S0016794020050119.

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», 2008, с. 68—81.

Решетняк М. Ю. Эволюция крупномасштабного геомагнитного поля за последние 12 тысяч лет // Геомагнетизм и аэронаука, 2020, т. 60, № 1, с. 126—136.

Серебренников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей. М., Наука, Физматгиз, 1965, 244 с.

Сорохтин О.Г., Чилингар Дж. В., Сорохтин Н.О. Теория развития Земли: происхождение, эволюция и трагическое будущее. М., Ижевск, Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010, 752 с.

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, 1982, 312 с.

Biggin A.J., McCormack A., Roberts A. Paleointensity database updated and upgraded // EOS Trans. Am. Geophys. Un., 2010, v. 91 (2), p. 15, doi: 10.1029/2010EO020003.

Gradstein F.M., Ogg G.J., van Kranendonk M. On the Geologic Time Scale 2008 // Newsl. Stratigr., 2008, v. 43 (1), p. 5—13.

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., 2003, v. 135, p. 211—223.

Hounslow M.W., Domeier M., Biggin A.J. Subduction flux modulates the geomagnetic polarity reversal rate // Tectonophysics, 2018, v. 742—743, p. 34—49, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.05.018>.

Kulakov E.V., Sprain C.J., Doubrovine P.V., Smirnov A.V., Paterson G.A., Hawkins L., Fairchild L., Piispa E.J., Biggin A.J. Analysis of an updated paleointensity database (Q_{PI}-PINT) for 65—200 Ma: Implications for the long-term history of dipole moment through the Mesozoic // *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2019, v. 124, p. 9999—10022, <https://doi.org/10.1029/2018JB017287>.

Kurazhkovskii A.Yu., Kurazhkovskaya N.A., Klain B.I. Calibration of geomagnetic paleointensity data based on redeposition of sedimentary rocks // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2011, v. 189 (1—2), p. 109—116, doi: 10.1016/j.pepi.2011.08.002.

Larson R.L., Olson P. Mantle plumes control magnetic reversal frequency // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991, v. 107 (3/4), p. 437—447.

MATLAB, Wavelet Toolbox Documentation. https://www.mathworks.com/help/wavelet/index.html?s_tid=CRUX_lftnav. Accessed December 17, 2018.

Mazaud A., Laj C., de Sèze L., Verosub K.L. 15-Myr periodicity in the frequency of geomagnetic reversals since 100 Myr // *Nature*, 1983, v. 304, p. 328—330.

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 Planet. Sci. Lett.*, 2013, v. 374, p. 227—238.

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.*, 2014, v. 196 (2), p. 694—711.

Yamazaki T., Yamamoto Y. Relative paleointensity and inclination anomaly over the last 8 Myr obtained from the Integrated Ocean Drilling Program Site 1335 sediments in the eastern equatorial Pacific // *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2018, v. 123, p. 7305—7320.

*Поступила в редакцию 13 июля 2021 г.,
принята в печать 20 сентября 2021 г.*