

УДК 550.383

ВСПЛЕСКИ ПАЛЕОНАПРЯЖЕННОСТИ В ИСТОРИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2020 г. А. Ю. Куражковский¹, *, Н. А. Куражковская¹, **, Б. И. Клайн¹, ***

¹Геофизическая обсерватория “Борок” филиал Института физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН, п. Борок, Ярославская обл., Россия

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

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

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

Поступила в редакцию 31.01.2020 г.

После доработки 10.02.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

Исследованы закономерности распределения экстремальных (всплесковых) повышений палеонапряженности в интервале 3000 млн лет – современность. Обнаружено, что всплески палеонапряженности, в несколько раз превышающие ее средние значения – H_{cp} , имели место в течение всей геомагнитной истории. Данные, полученные по термонамагнитным породам, позволили выделить в спектре изменений палеонапряженности вариации с характерными временами 200 млн лет. В результате вейвлет анализа данных по осадочным породам обнаружены вариации палеонапряженности с характерными временами 5 млн лет, 400 и 100 тыс. лет. До рубежа 40 млн лет наиболее значительные всплесковые возрастания палеонапряженности с амплитудами 8–9 H_{cp} происходили с характерными временами 5 млн лет. Продолжительности всплесковых повышений палеонапряженности вне зависимости от их интенсивности не превышали 100 тыс. лет. После рубежа 40 млн лет происходило уменьшение амплитуд и характерных времен вариаций палеонапряженности. Циклические изменения палеонапряженности совпадали по длительности с циклами литосферных и космопланетарных процессов.

DOI: 10.31857/S0016794020050119

1. ВВЕДЕНИЕ

При обсуждении эволюционных изменений, происходивших с геомагнитным полем, из рассмотрения обычно выпадает такое значимое (энергетически самое значимое) геомагнитное явление, как всплески палеонапряженности, в несколько раз превышающие ее средние значения [Куражковский и др., 2003]. Всплескам палеонапряженности свойственна определенная цикличность, которая по предварительным оценкам составляла несколько млн лет. По имеющимся оценкам мощность, расходуемая на генерацию современного геомагнитного поля, сопоставима с мощностью всех тепловых глубинных процессов [Соколов, 2004; Решетняк и Павлов, 2016]. Это, по-видимому, объясняет тот факт, что многократные возрастания палеонапряженности, не были продолжительными. Причины возникновения всплесков палеонапряженности и даже их распределение относительно оси геологического времени во многом остаются неизвестными.

Традиционно предполагается, что поведение главного геомагнитного поля в значительной сте-

пени определяется динамикой тепловых процессов, происходящих в жидком ядре Земли и на границе ядро–мантия [Соколов, 2004]. При этом квазипериодичности вариаций палеонапряженности, связанные с конвекционными процессами в ядре Земли, не превышают 10 тыс. лет [Соколов, 2004; Решетняк и Павлов, 2016]. В соответствии с этим вариации палеонапряженности с характерными временами более 10 тыс. лет мы будем называть “длиннопериодными”. На данный момент известны вариации палеонапряженности с характерными временами порядка 100 тыс. лет, происходившие в плейстоцене [Valet, 2003], и несколько миллионов лет в интервале 167–42 млн лет [Куражковский и др., 2019a].

По нашему мнению, исследования всплесковых повышений палеонапряженности должно быть составной частью изучения спектрального состава длиннопериодных изменений палеонапряженности. Согласно теоретическим представлениям, вариации палеонапряженности с характерными временами более 10 тыс. лет связаны с особенностями теплообмена между ядром, мантией и литосферой [Решетняк, 2015]. Отсутствие

Таблица 1. Средние значения палеонапряженности по термонамагнитным породам из PINT (2015.05) на различных интервалах геологического времени

Возраст	<i>n</i>	H_{cp} , мкТл	σ , мкТл
Архей (более 2500 млн лет)	82	27	14
Протерозой (2500–540 млн лет)	276	25	17
Палеозой (540–250 млн лет)	390	28	16
Мезозой (250–66 млн лет)	761	27	19
Палеоген (66–23 млн лет)	403	29	19
(23–2.5 млн лет)	994	29	21

Примечание: *n* – количество определений палеонапряженности по термонамагнитным породам; H_{cp} – средние значения палеонапряженности; σ – дисперсии значений палеонапряженности.

данных о спектре характерных времен вариаций палеонапряженности не позволяет приступить к систематизации факторов, влияющих на поведение геомагнитного поля. Одним из элементов, необходимых для ее формирования является установление корреляционных связей между изменениями палеонапряженности с циклическими литосферными и космопланетарными процессами.

Увеличение массива данных, полученных по термонамагнитным (база данных PINT (2015.05)) и новые данные по осадочным [Yamazaki and Yamamoto, 2018; Куражковский и др., 2019б] породам, позволяет продолжить исследование закономерностей изменений палеонапряженности на больших интервалах геологического времени.

В настоящей работе мы предприняли попытку определить спектр длиннопериодных вариаций палеонапряженности и продолжить поиск общих циклическостей, свойственных поведению геомагнитного поля и другим геофизическим процессам.

2. АНАЛИЗИРУЕМЫЙ МАТЕРИАЛ

В этом исследовании мы использовали все доступные результаты определений палеонапряженности в фанерозое и докембрии, которые позволяли обсуждать проблему временного распределения ее всплесков в геомагнитной истории. Данные палеонапряженности по осадочным породам фанерозоя взяты из работ [Ohneiser et al., 2013; Yamamoto et al., 2014; Yamazaki and Yamamoto, 2018; Куражковский и др., 2019а, 2019б]. Результаты определений палеонапряженности по термонамагнитным породам взяты из базы данных PINT (2015.05) (<http://earth.liv.ac.uk/pint/>), описание которой приведено в работе [Biggin et al., 2010]. Для проведения спектрального анализа кривые палеонапряженности из работ [Ohneiser et al., 2013; Yamamoto et al., 2014] и [Куражковский и др., 2019а] были оцифрованы с шагом 10 и 50 тыс. лет, соответственно.

Средние значения (H_{cp}) и дисперсии (σ) палеонапряженности из PINT (2015.05), соответствующие различным интервалам геологического времени, приведены в таблице. Количество палеомагнитных данных убывает с удалением от современности. В связи с этим, продолжительности рассмотренных временных интервалов, для которых рассчитывались H_{cp} , определялись не только с принятой в геологии периодизацией, но и количеством палеомагнитных данных.

Согласно данным из табл. 1, средние значения палеонапряженности и ее дисперсии с течением геологического времени изменялись незначительно. Тем не менее, имело место небольшое возрастание значений H_{cp} от прошлого к современности (рис. 1), которое могло быть связано как с эволюционными изменениями геомагнитного поля, так и процессом “остаривания” остаточной намагниченности исследуемых образцов горных пород.

Ранее при обсуждении поведения палеонапряженности в мелу–палеогене [Куражковский и др., 2019а] мы использовали калиброванные данные, которые можно было переводить в любые единицы. В качестве всплесков мы рассматривали повышения палеонапряженности, более чем в 2 раза превышающее H_0 , где H_0 – среднее значение современного геомагнитного поля, принятое равным 40 мкТл. В настоящей работе используются как калиброванные из PINT (2015.05) и [Куражковский и др., 2019а], так и не калиброванные данные, полученные в относительных единицах. В связи с этим в ряде случаев при совместном использовании данных, полученных по осадочным и термонамагнитным породам, мы представляли значения палеонапряженности не в мкТл, а как отношение H/H_{cp} . Это позволяло совместно анализировать данные палеонапряженности, которые ранее были получены в “абсолютных” и “относительных” единицах, а также нивелировать различия, связанные с остаренностью намагниченности образцов различного возраста. В качестве всплесков мы будем рассматривать по-

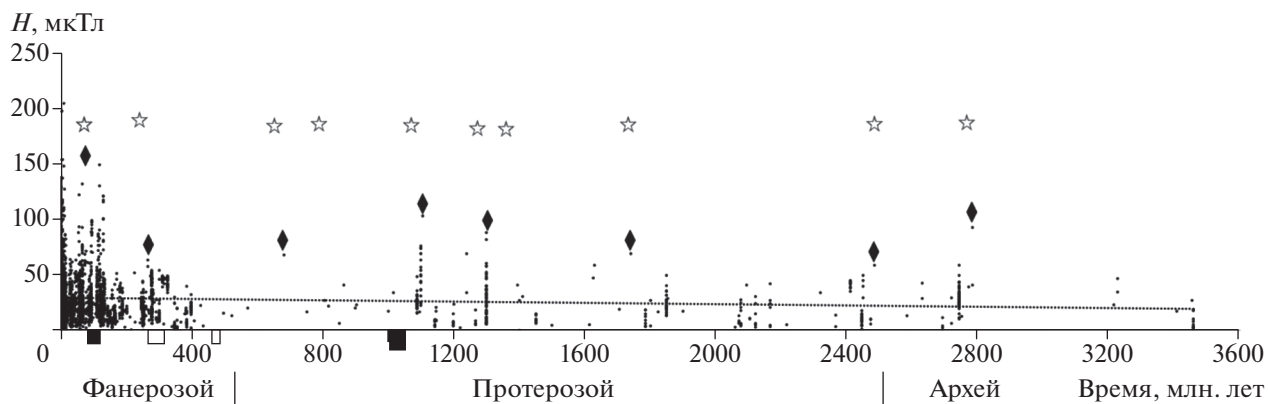


Рис. 1. Результаты определений палеонапряженности по термонамагнитным породам (точки) из базы данных PINT (2015.05). Ромбами указаны всплески палеонапряженности, звездочками активизации базальтового магматизма из работы [Чумаков, 2005]. Черные и светлые прямоугольники ниже оси абсцисс обозначают суперхроны прямой и обратной полярности, соответственно. Пунктирной линией показан тренд изменений средних значений палеонапряженности.

вышения палеонапряженности, которые превышали $3H_{cp}$. Для ранее исследованного интервала мел–палеоген величины $3H_{cp}$ и $2H_0$ различаются незначимо. Как видно из таблицы, во всех временных интервалах величина $3H_{cp}$ в несколько раз превышала σ . Следовательно, всплесковые значения палеонапряженности многократно превышали случайные ошибки ее определений и являлись значимыми.

Выборка данных о наиболее значительных активизациях базальтового магматизма взята нами из работы [Чумаков, 2005]. Стратиграфические и хронологические датировки рассматриваемых особенностей поведения геомагнитного поля в фанерозое приведены в соответствии с геохронологической шкалой (Geologic Time Scale 2008-GTS 08) [Gradstein et al., 2008].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунке 1 приведены все результаты определений палеонапряженности из базы данных PINT (2015.05), относящиеся к интервалу 3500–0.05 млн лет. Согласно этим данным, экстремальные возрастания палеонапряженности происходили около 2700, 2500, 1750, 1300, 1100, 700, 300 и 100 млн лет. Перед экстремальными возрастаниями и после них палеонапряженность имела существенно меньшие значения. Это позволяет рассматривать обнаруженные повышения палеонапряженности как ее всплески. Максимальные возрастания палеонапряженности в архее – протерозое изменялись в пределах $3–5H_{cp}$ и достигали 120 мкТл (около $5H_{cp}$). Интервалы между экстремальными возрастаниями напряженности геомагнитного поля в раннем архее – фанерозое составляли либо около 200 млн лет, либо имели

продолжительности, кратные 200 млн лет. Впервые вариации напряженности геомагнитного поля с такими характерными временами были обнаружены в интервале 400 млн лет – современность в работе [Большаков и Солодовников, 1980]. Новые данные из PINT (2015.05) дают основание для предположения о том, что вариации палеонапряженности с характерными временами около 200 млн лет происходили в течение всей геомагнитной истории. Как видно из рис. 1, все обнаруженные всплески палеонапряженности происходили при активизациях базальтового (плюмового) магматизма. Это свидетельствует в пользу того, что всплесковым активизациям геомагнитного поля свойственна такая же цикличность, как и активизациям литосферных (тектонических и магматических) процессов (циклом Бертраана).

Определения палеонапряженности по осадочным породам позволили получить значительно более полное представление о всплесковых активизациях палеонапряженности, чем данные, полученные по термонамагнитным породам. Так, в фанерозое (в конце палеозоя, около 300 млн лет) по термонамагнитным породам было обнаружено одно значительное повышение палеонапряженности (рис. 1). По осадочным породам перми–триаса было показано, что этот всплеск палеонапряженности в конце палеозоя не был единственным [Куражковский и др., 20196]. В это время происходила активизация геомагнитных процессов, в ходе которой имела место серия всплесков палеонапряженности (рис. 2). При этом интервалы между всплесками палеонапряженности составляли несколько миллионов лет (в среднем около 4 млн лет). Во время всплесков повышения палеонапряженности могли в 8–9 раз превышать ее среднее значение. Интенсивность

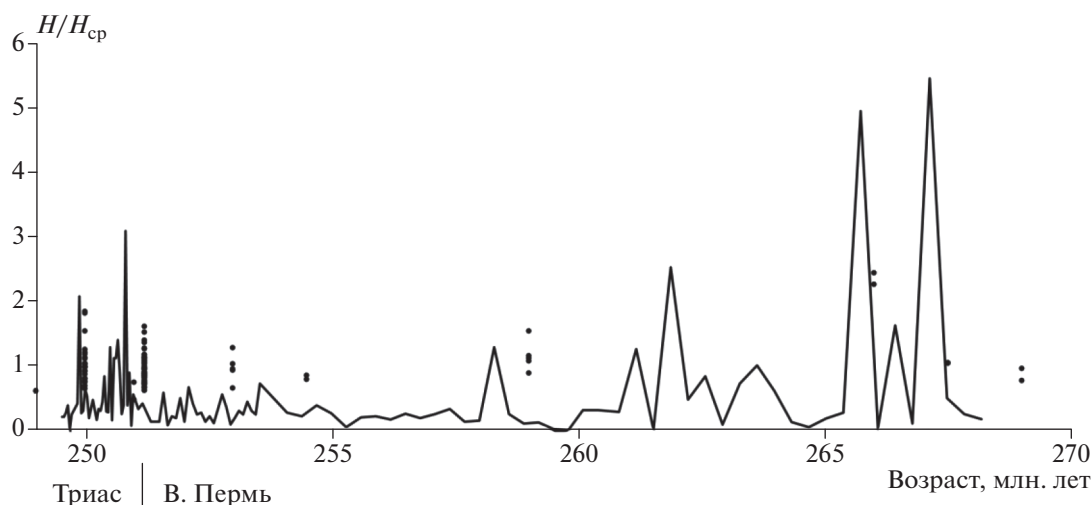


Рис. 2. Поведение палеонапряженности по осадочным (кривая) и термонамагнитным породам (точки) в конце палеозоя из [Куражковский и др., 2019б].

всплесков снижалась по мере приближения к границе палеозой–мезозой.

Наиболее детально исследована всплесковая активизация геомагнитного поля, происходившая в мелу–начале палеогена (130–50 млн лет). В этом временном интервале для исследования всплесковой активизации геомагнитного поля совместно использовались данные, полученные по осадочным и по термонамагнитным породам (рис. 3). Исследования, проведенные по морским отложениям [Куражковский и др., 2019а], показали, что всплесковые возрастания палеонапряженности обычно состояли из одной – двух ее вариаций, происходивших с большими амплитудами. По предварительным оценкам (точность которых лимитировалась подробностью отбора образцов), длительность всплесковых повышений палеонапряженности не превышала 100 тыс. лет. Интервалы между всплесками палеонапряженности изменялись в пределах 1–10 млн лет, но в среднем (так же, как в палеозое) составляли около 5 млн лет. От начала мела к началу палеогена амплитуды всплесков палеонапряженности возрастали. Максимальные амплитуды всплесков составляли $8-9H_{ср}$. Всплески палеонапряженности, “регистрируемые” термонамагнитными и осадочными породами, несколько различались по амплитуде, но с хорошей точностью совпадали между собой по возрасту (рис. 3). Обнаружение 8-ми всплесков палеонапряженности по термонамагнитным породам в относительно небольшом временном интервале (130–50 млн лет), свидетельствует о том, что активизации геомагнитной и магматической активности в мезозое–начале кайнозоя – это сопутствующие друг другу явления.

Данные из PINT (2015.05) позволяют сделать оценки изменений виртуальных палеогеомагнит-

ных широт, соответствующих местам образования вулканитов, по которым обнаруживались максимумы палеонапряженности. В их расположении относительно виртуального палеогеомагнитного поля мы выделили условно две градации: низкоширотные (до 45°) и высокоширотные (более 45°). На рисунке 3 они обозначены соответственно буквами (Н) и (В). В начале геомагнитной активизации (130–90 млн лет) и в ее конце (90–50 млн лет) всплески палеонапряженности (по вулканитам) фиксировались, соответственно в высоких и низких геомагнитных широтах. Таким образом, в ходе мел – палеогеновой активизации геомагнитных процессов виртуальный палеогеомагнитный пояс образования вулканитов, фиксирующих всплески палеонапряженности, смешался от высоких широт к низким. Ранее широтная квазипериодичность (с характерными временами около 200 млн лет) в изменениях магматической активности была показана в работе [Авсюк и др., 2007]. По мнению авторов этой работы, широтные изменения магматической активности были связаны с изменениями гравитационного взаимодействия в системе Земля–Луна–Солнце.

После рубежа 40 млн лет амплитуды и характерные времена вариаций палеонапряженности уменьшились. По данным [Ohneiser et al., 2013; Yamamoto et al., 2014; Куражковский и др., 2019а] в интервале 40–10 млн лет возрастания палеонапряженности, превышающие $3H_{ср}$, не обнаружены.

Исследования палеонапряженности по молодым, образовавшимся в конце неогена термонамагнитным породам (рис. 1 и рис. 4), показали, что средние значения и амплитуды вариаций палеонапряженности несколько возросли по отношению к более удаленным интервалам геологического времени. При этом следует отметить, что у

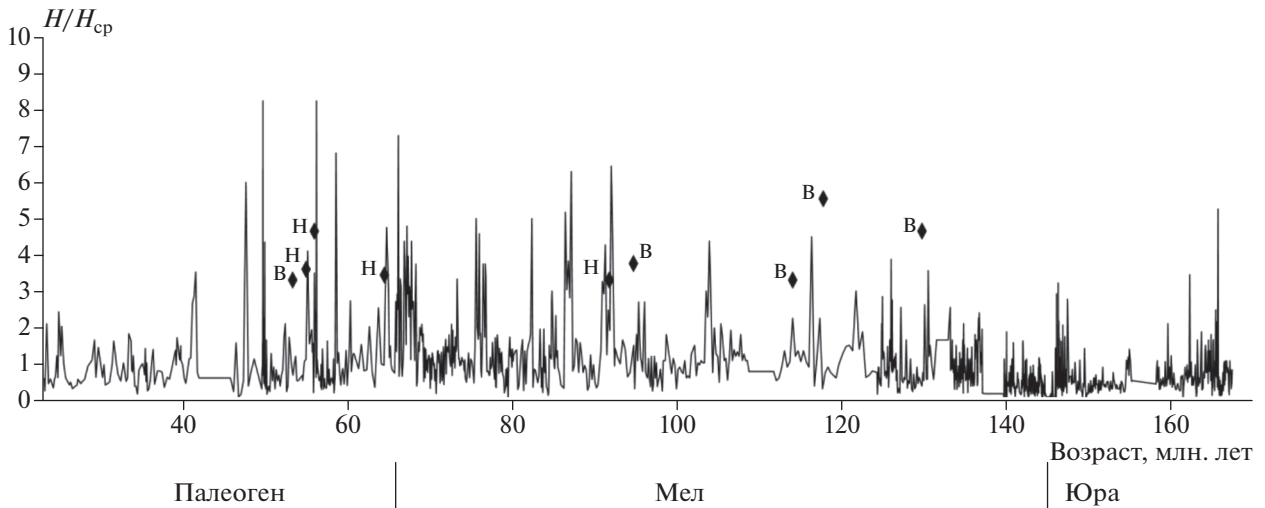


Рис. 3. Поведение палеонапряженности по осадочным породам в интервале 167–23 млн лет из [Куражковский и др., 2019a], ромбами обозначены всплески палеонапряженности по термонамагнитным породам из PINT (2015.05). Виртуальная палеоширотная локализация термонамагнитных пород, фиксирующих всплески палеонапряженности. Высокоширотная и низкоширотная локализация обозначена, соответственно буквами (H) и (B).

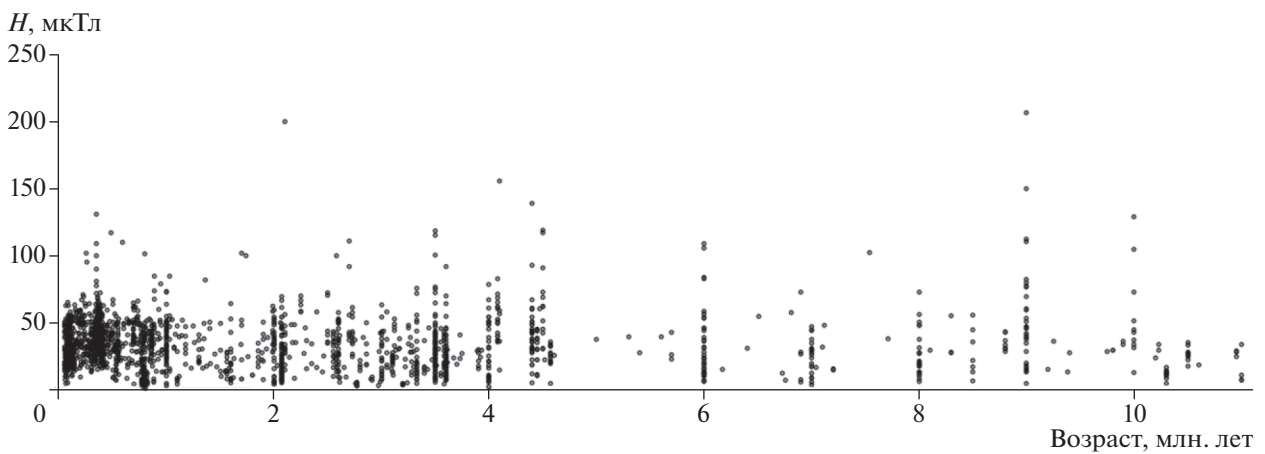


Рис. 4. Результаты определений палеонапряженности в интервале 10–0.05 млн лет из PINT (2015.05).

нас нет уверенности в том, что эти различия в оценках значений палеонапряженности по молодым и более древним породам не связаны с эффектом “остаренности” остаточной намагниченности. Оценить характерные времена вариаций палеонапряженности по данным, полученным по термонамагнитным породам, крайне сложно. Тем не менее, по предварительным оценкам интервалы между максимальными возрастаниями палеонапряженности, в среднем, были значительно меньше, чем в палеозое — начале кайнозоя (рис. 4). В работах [Kok and Tauxe, 1999; Yamazaki and Yamamoto, 2018] показаны резкие кратковременные повышения палеонапряженности, обнаруженные по океанским отложениям позднего неогена. Эти повышения палеонапряженности

можно рассматривать как ее всплески. Продолжительности таких кратковременных повышений палеонапряженности в конце неогена (так же, как и в мезозое) не превышали 100 тыс. лет. Вероятно, с течением геологического времени длительности всплесковых повышений палеонапряженности не изменялась.

Предварительное представление о характерных временах вариаций палеонапряженности было сделано на основе данных, показанных на рис. 1, 2 и 3. По этим кривым визуально обнаруживаются вариации напряженности геомагнитного поля с характерными временами порядка 200 и 5 млн лет. Вейвлет анализ кривых изменений палеонапряженности в интервалах 167–23, 42–23 и 19.5–12 млн лет (рис. 5), позволяет прове-

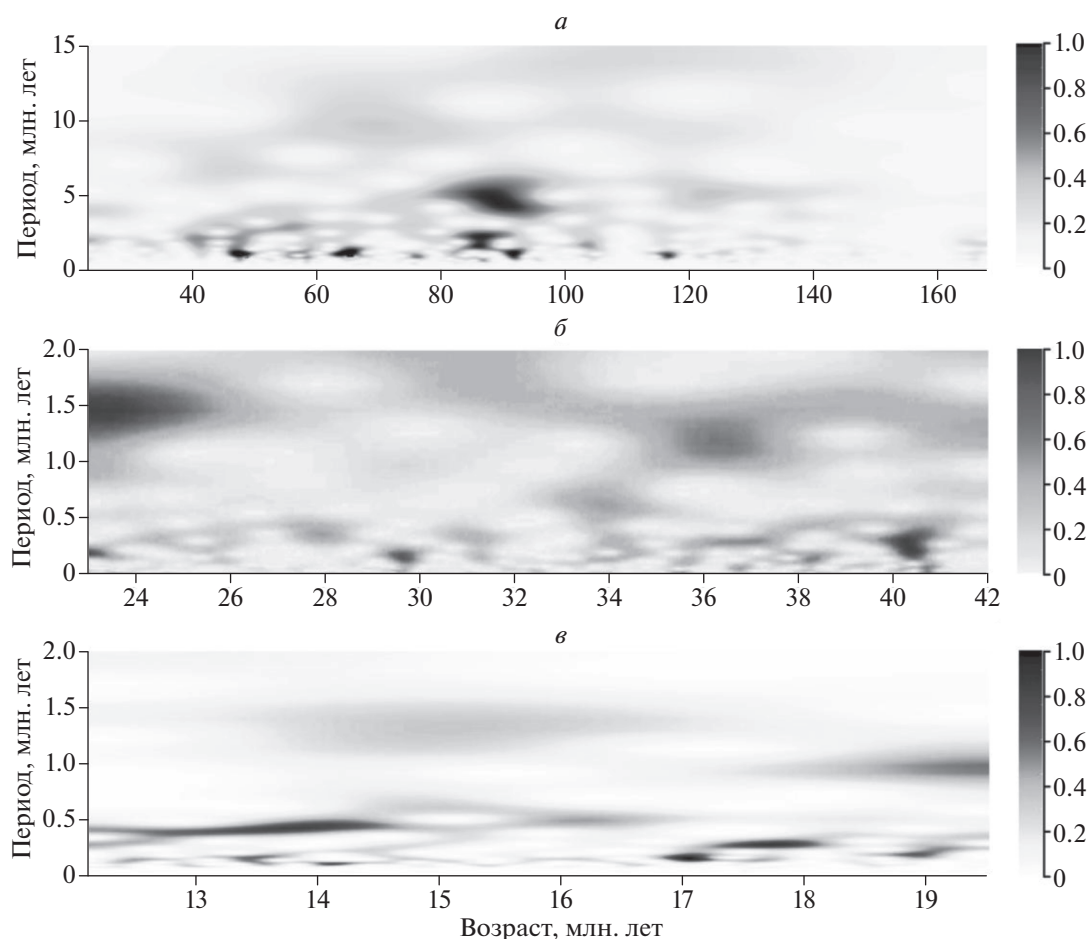


Рис. 5. Вейвлет-диаграммы кривых, характеризующих поведение палеонапряженности в интервалах (а) 167–23 млн лет из [Куражковский и др., 2019а], (б) 42–23 млн лет из [Yamamoto et al., 2014] и (в) 19.5–12 млн лет из [Ohneiser et al., 2013].

сти более детальное исследование вариаций палеонапряженности. Так, в интервале 167–40 млн лет (рис. 5а) спектр вариаций палеонапряженности имел максимальную ширину 0.1–10 млн лет. В этом интервале наибольшую спектральную плотность имели вариации с характерными временами около 5 млн лет. В интервале 40–23 млн лет (рис. 5а, 5б) ширина спектра вариаций палеонапряженности уменьшилась до 0.1–4 млн лет. В интервале 19.5–12 млн лет вариации палеонапряженности с характерными временами 5 млн лет не обнаруживались (рис. 5в). При этом ширина спектра вариаций палеонапряженности сократилась до диапазона 0.1–0.5 млн лет. Существование вариаций палеонапряженности в диапазоне 0.1–0.5 млн лет прослеживается на всех исследованных интервалах геологического времени (рис. 5). Во всех случаях диапазон характерных времен вариаций палеонапряженности был дискретным. Максимальной спектральной плотностью обладали вариации с характерными временами 0.1, 0.4 и 5 млн лет. В спектре циклических изменений

палеонапряженности следует выделить вариации с характерными временами несколько млн лет. Амплитуды и характерные времена (рис. 2, рис. 5а, 5б) этих вариаций изменялись с течением геологического времени.

Характерные времена, свойственные спектру изменений палеонапряженности, совпадают с длительностями известных циклов геологических и космопланетарных процессов. Так, циклическостью порядка 200 млн лет обладают циклы Бертрана, циклы изменений силы гравитационного взаимодействия в системе Земля–Луна–Солнце [Авсюк, 1993], продолжительность оборота солнечной системы относительно центра галактики. Вариации палеонапряженности с характерными временами несколько (в среднем ~5 млн лет) совпадали с циклами трансгрессии – регрессии мирового океана [Куражковский и др., 2019а]. Характерные времена вариаций палеонапряженности (100 и 400 тыс. лет) совпадают с большими и малыми циклами изменений экс-

центриситета земной орбиты – циклами Миланковича.

Ранее связь изменений палеонапряженности с космопланетарными циклами (23, 41 и 100 тыс. лет) в интервале 800 тыс. лет – современность анализировалась в работе [Valet, 2003]. При этом было показано, что в интервале 800 тыс. лет – современность наибольшей спектральной плотностью обладали вариации палеонапряженности с характерными временами порядка 100 тыс. лет. Анализ данных, используемых в настоящей работе, показал, что цикличность изменений палеонапряженности с такими характерными временами обнаруживается также в интервале 150 млн лет – современность (и, вероятно, в более отдаленные интервалы геологического времени). Исследованные нами вариации палеонапряженности можно условно разделить на два класса: это вариации, которые имеют общие цикличности с космопланетарными процессами (200, 0.4 и 0.1 млн лет) и вариации палеонапряженности, которые связаны с цикличностью геологических процессов (несколько млн лет).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Массивы палеомагнитных данных, полученные как по термонамагнитным, так и по осадочным породам, свидетельствуют о том, что многократные кратковременные повышения палеонапряженности, безусловно, существовали. Оценки максимальных повышений палеонапряженности (до $8-9H_{cp}$), сделанные в настоящей работе, в последствии вероятно могут быть скорректированы в пользу увеличения. Мы предполагаем, что более высокие значения палеонапряженности могут быть обнаружены при более подробном изучении древних морских отложений, которые позволят исследовать ее поведение с лучшим временным разрешением.

В пользу предположения о том, что вариации палеонапряженности с характерными временами (200 млн лет, 400 и 100 тыс. лет) связаны с цикличностью (внешних по отношению к Земле) космических процессов, может свидетельствовать неизменность их спектра в течение больших интервалов геологического времени. Подобное поведение спектра вариаций напряженности геомагнитного поля можно интерпретировать как независимость характерных времен этих вариаций палеонапряженности от эволюционных изменений среды, в которой происходила генерация геомагнитного поля. Маловероятно, что физические параметры среды, определяющей характеристики геомагнитного поля, не изменялись в течение продолжительных интервалов геологического времени. В связи с этим мы предполагаем, что вариации палеонапряженности, цикличность которых не изменяется с течением геологического

времени, имеют внешний (по отношению к ядру и мантии) космопланетарный генезис. Вариации палеонапряженности с характерными временами несколько (в среднем 5) млн лет связывались нами с особенностями взаимодействия между системами ядро–мантия и мантия–литосфера [Куражковский и др., 2019a]. С течением геологического времени у этого класса вариаций изменялись как характерные времена, так и амплитуды. По нашему мнению, данные о вариациях палеонапряженности с характерными временами несколько млн лет могут служить источником информации об эволюционных изменениях систем ядро–мантия и мантия–литосфера.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имеющиеся палеомагнитные данные показали, что всплесковые повышения палеонапряженности на величину более, чем в 3 раза превышающие ее средние значения ($3H_{cp}$) имели место на всем протяжении геомагнитной истории (порядка 3 млрд. лет). Данные, полученные по термонамагнитным породам, позволили выделить вариации Палеонапряженности с характерными временами 200 млн лет. В результате вейвлет анализа данных по осадочным породам обнаружены вариации палеонапряженности с характерными временами 5 млн лет, 400 и 100 тыс. лет.

Продолжительности всплесковых повышений палеонапряженности вне зависимости от их интенсивности составляли около 100 тыс. лет. Исследованные нами вариации палеонапряженности разделены на два класса: 1) вариации, которые имеют общие цикличности с космопланетарными процессами (200, 0.4 и 0.1 млн лет); 2) вариации палеонапряженности (в диапазоне 1–10 млн лет), которые связаны с цикличностью геологических процессов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания (№ 0144-2014-00116).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авсюк Ю.Н. Эволюция системы Земля–Луна и ее место среди проблем нелинейной геодинамики // Геотектоника. № 1. С. 13–22. 1993.
- Авсюк Ю.Н., Салтыковский А.Я., Геншафт Ю.С. Широтная активизация магматизма как отражение циклического хода приливной эволюции Земля–Луна–Солнце // Докл. РАН. Т. 413. № 1. С. 66–67. 2007.
- Большаков А.С., Солодовников Г.М. Напряженность геомагнитного поля в последние 400 миллионов лет // ДАН СССР. Т. 260. № 6. С. 1340–1343. 1981.
- Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Клайн Б.И., Гужиков А.Ю. Режимы генерации геомагнитного поля

- в меловом периоде // ДАН. Т. 390. № 6. С. 825–827. 2003.
- *Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Клайн Б.И.* Вариации напряженности геомагнитного поля с характерными временами ~5 и 1 млн лет // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 2. С. 265–272. 2019а.
- *Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Клайн Б.И.* Связь активизаций магматических процессов с поведением палеонапряженности // Двдцатая международная конференция “Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле” Москва, 23–25, Борок, 27 сентября 2019 г. Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН. С. 160–163. 2019б.
- *Решетняк М.Ю., Павлов В.Э.* Эволюция дипольного геомагнитного поля. Наблюдения и модели // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 1. С. 117–132. 2016.
- *Решетняк М.Ю.* Пространственные спектры геомагнитного поля в наблюдениях и моделях геодинамо // Физика Земли. № 3. С. 39–46. 2015.
- *Соколов Д.Д.* Геодинамо и модели генерации геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 5. С. 579–589. 2004.
- *Чумаков Н.М.* Причины глобальных климатических изменений по геологическим данным. // Стратиграфия. Геологическая корреляция. Т. 13. № 3. С. 3–25. 2005.
- *Biggin A.J., McCormack A., Roberts A.* Paleointensity database updated and upgraded // EOS Trans. Am. geophys. Un. V. 91. № 2. P. 15. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2010EO020003>
- *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.
- *Kok Y.S., Tauxe L.* A relative geomagnetic paleointensity stack from Ontong-Java Plateau sediments for the Matuyama // J. Geophysical Research. Solid Earth. V. 104 (B11). P. 25401–25413. 1999.
- *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. V. 374. P. 227–238. 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.
- *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 // Journal of Geophysical Research. Solid Earth. V. 123. P. 7305–7320. 2018.
- *Valet Y.-P.* Time variations in geomagnetic intensity // Rev. Geophys. V. 41, 1/1004. 2003.
<https://doi.org/10.1029/2001RG000104>