

УДК 550.384

ПЕРИОД ГИПЕРАКТИВНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КОНЦЕ ЭДИАКАРИЯ: ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ ИНВЕРСИЙ ЦИКЛОСТРАТИГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

© 2021 г. Н. М. Левашова^{1, *}, И. В. Голованова^{2, **}, Д. В. Рудько³, К. Н. Данукалов²,
С. В. Рудько¹, Р. Ю. Сальманова², Н. Д. Сергеева²

¹Геологический институт РАН, г. Москва, Россия

²Институт геологии УФИЦ РАН, г. Уфа, Россия

³Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: namile2007@rambler.ru

**E-mail: golovanova@ufaras.ru

Поступила в редакцию 30.12.2019 г.

После доработки 31.08.2020 г.

Принята к публикации 07.09.2020 г.

Ранее при палеомагнитном изучении осадочных пород верхневендской зиганской свиты на западном склоне Южного Урала обнаружено необычно большое количество зон магнитной полярности [Bazhenov et al., 2016]. Возраст этой свиты был определен по магматическим цирконам из туфового прослоя как 547.6 ± 3.8 млн лет. По оценкам, выполненным из самых общих соображений, частота инверсий составляет где-то 20–30 инверсий за миллион лет, что примерно в два-три раза больше, чем самая высокая частота инверсий, обнаруженная в фанерозое. В настоящей работе для более точной оценки частоты инверсий выполнено циклостратиграфическое исследование нижней красноцветной части (74 м) самого протяженного из изученных ранее палеомагнитным методом непрерывного разреза зиганской свиты на автодороге Стерлитамак–Магнитогорск. Сравнение результатов проведенных детальных циклостратиграфических исследований с магнитостратиграфической колонкой дало возможность более достоверно оценить частоту инверсий. Изученный разрез, в котором было найдено 20 инверсий, накапливался в течение 1.6 млн лет, то есть частота инверсий в этом интервале времени составляет 12–13 инверсий за миллион лет. Полученные количественные оценки показывают, что в прежних оценках предполагаемая частота инверсий завышена примерно вдвое. Однако и такая частота инверсий может рассматриваться как аномально высокая, и вывод о том, что в конце эдиакария, 547.6 ± 3.8 млн лет назад, был период с аномально высокой частотой инверсий можно считать подтвержденным.

Ключевые слова: палеомагнетизм, циклостратиграфия, магнитостратиграфия, Южный Урал, верхний венд, зиганская свита.

DOI: 10.31857/S000233721020022

ВВЕДЕНИЕ

Изучение эволюции магнитного поля Земли является ключевым для разработки физической теории геомагнетизма. Как принято считать, магнитное поле Земли может находиться в двух состояниях: квазистабильном, которое в первом приближении описывается как поле осевого центрального диполя и в состоянии инверсии — перехода от квазистабильного состояния одной полярности к квазистабильному состоянию другой полярности. Обычно полярность магнитного поля меняется каждые несколько сотен тысяч лет. Авторы работы [Biggin et al., 2012] полагают, что максимальная частота инверсий в фанерозое может достигать 8–10 инверсий за миллион лет, но

большинство исследователей придерживаются более консервативной оценки — 4–6 инверсий за миллион лет. Иногда полярность не меняется несколько миллионов лет. Известны в истории Земли и периоды, когда полярность магнитного поля сохранялась неизменной более десяти миллионов лет — так называемые “суперхроны”.

В последние 10–15 лет стали появляться работы, которые указывают на возможность существования отдельных интервалов в истории Земли, когда частота инверсий была значительно выше того, что считается нормальным [Павлов и др., 2004; Biggin et al., 2012; Levashova et al., 2013; Halls, 2015; и др.]. Наконец, в работах [Bazhenov et al., 2016; Meert et al., 2016] были опубликованы палеомагнитные дан-

ные, показывающие, что в самом конце эдиакария был период, когда частота инверсий достигала 25–30 за млн лет. Настолько аномальные данные заставили авторов выдвинуть гипотезу о возможности существования третьего, “гиперактивного”, состояния магнитного поля.

Исторически сложилось так, что изучение этого интервала времени началось с исследований разреза ергинской свиты котлинского горизонта верхнего венда в районе Зимнего Берега Архангельской области. В нижней части изученного разреза присутствуют пепловые прослои, датированные 550 ± 4.6 млн лет [Popov et al., 2005]. Здесь в единой последовательности глинисто-песчаных отложений мощностью 90 м на р. Золотица, а также в скважине “Верхотина” было обнаружено 27 инверсий магнитной полярности [Popov et al., 2002; Popov et al., 2005; Iglesia Llanos et al., 2005]. Хотя в непрерывном разрезе относительно небольшой мощности было отмечено необычно большое число геомагнитных инверсий, никаких предположений о причине их аномально высокой частоты выдвинуто не было.

Позже были изучены красноцветные толщи зиганской свиты Южного Урала, возраст которых по разным данным, полученным по циркону из туфового прослоя в районе г. Усть-Катав, составляет 548.2 ± 7.6 млн лет [Гражданкин и др., 2011] или 547.6 ± 3.8 млн лет [Levashova et al., 2013]. Здесь 100 метров разреза были опробованы очень детально, и было обнаружено более 30 инверсий. Сопоставив эти данные с одновозрастными данными по Зимнему Берегу Архангельской области, авторы с высокой степенью уверенности смогли предположить, что в конце эдиакария был интервал времени, когда частота инверсий достигала 20–30 за млн лет [Bazhenov et al., 2016]. Именно тогда возникла гипотеза о “гиперактивном” состоянии магнитного поля на границе докембрия и палеозоя [Meert et al., 2016].

Гипотеза о том, что магнитное поле в конце эдиакария было гиперактивным, вызвала резонанс как в геологическом, так и в биологическом научном сообществе [Doglioni et al., 2016; Geyer, Landing, 2017; Duan et al., 2018; Landing et al., 2018; Liu et al., 2018; и др.]. Однако эта многообещающая гипотеза оказалась весьма уязвимой, поскольку у авторов не было возможности хоть с какой-то достоверностью определить длительность накопления изученного разреза. Понятно, что достоверность предположений о частоте инверсий полностью зависит от достоверности определения длительности изученного интервала времени. В работе [Bazhenov et al., 2016] оценка длительности осадконакопления свелась к следующему: раз не известны случаи накопления подобных осадочных пород со скоростью более 5 см за тысячу лет (50 м за миллион лет), то и изученные 100 м

алевропесчаников никак не могли накапливаться дольше, чем 1–2 млн лет. При такой оценке частота инверсий составляет примерно 20–30 инверсий за млн лет, что в два-три раза больше, чем самая высокая частота инверсий в фанерозое.

Чтобы более обосновано судить о частоте инверсий геомагнитного поля в терминальном эдиакарии было проведено детальное циклостратиграфическое изучение нижней красноцветной части (74 м) самого протяженного, непрерывного и представительного по мощности (460 м) разреза зиганской свиты из изученных [Bazhenov et al., 2016]. В этом разрезе отложения зиганской свиты вскрыты в дорожных выемках по новой автодороге Стерлитамак–В. Авзян на участке с. Макарово–с. Кулгунино, проложенной в междуречье Зигана и Кукраука (N 53°34'20" и E 056°40'40"). Сравнение результатов циклостратиграфических исследований с магнитостратиграфической колонкой, полученной в работе [Bazhenov et al., 2016], дало возможность достоверно оценить частоту инверсий в верхнем эдиакарии и проверить состоятельность концепции “гиперактивного” поля.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОПРОБОВАННОГО РАЗРЕЗА

Мощные верхнепротерозойские отложения Башкирского мегантиклинория (рис. 1а) являются одним из наиболее полных разрезов рифея и эдиакария в мире. Здесь выделены стратотипы многих подразделений рифея региональной стратиграфической шкалы докембрия в интервале от 542 млн лет [Gradstein et al., 2012] до 1800 млн лет [Пучков и др., 2016].

Самым верхним подразделением толщи на западе мегантиклинория является ашинская серия эдиакарского возраста, в составе которой выделено пять свит (рис. 1б), сложенных исключительно терригенными осадками. Две нижние свиты (бакеевская и урюкская) имеют преимущественно аркозовый состав песчаников и алевролитов, а три верхние (басинская, куккараукская и зиганская) — полимиктовый. В целом ашинская серия рассматривается как моласса [Беккер, 1988], но специфическая черта моласс — полимиктовость — выражена только в ее верхней части.

Самым верхним членом ашинской серии является зиганская свита. По простиранию свита испытывает значительные фациальные изменения. В одних разрезах преобладают песчаники и алевролиты, а в других — аргиллиты. Хотя соотношение пород (песчаники, алевролиты и аргиллиты) в переслаивании по латерали значительно меняется, но общий петрографический состав, структурно-текстурные особенности и внешний облик их остаются практически неизменными.

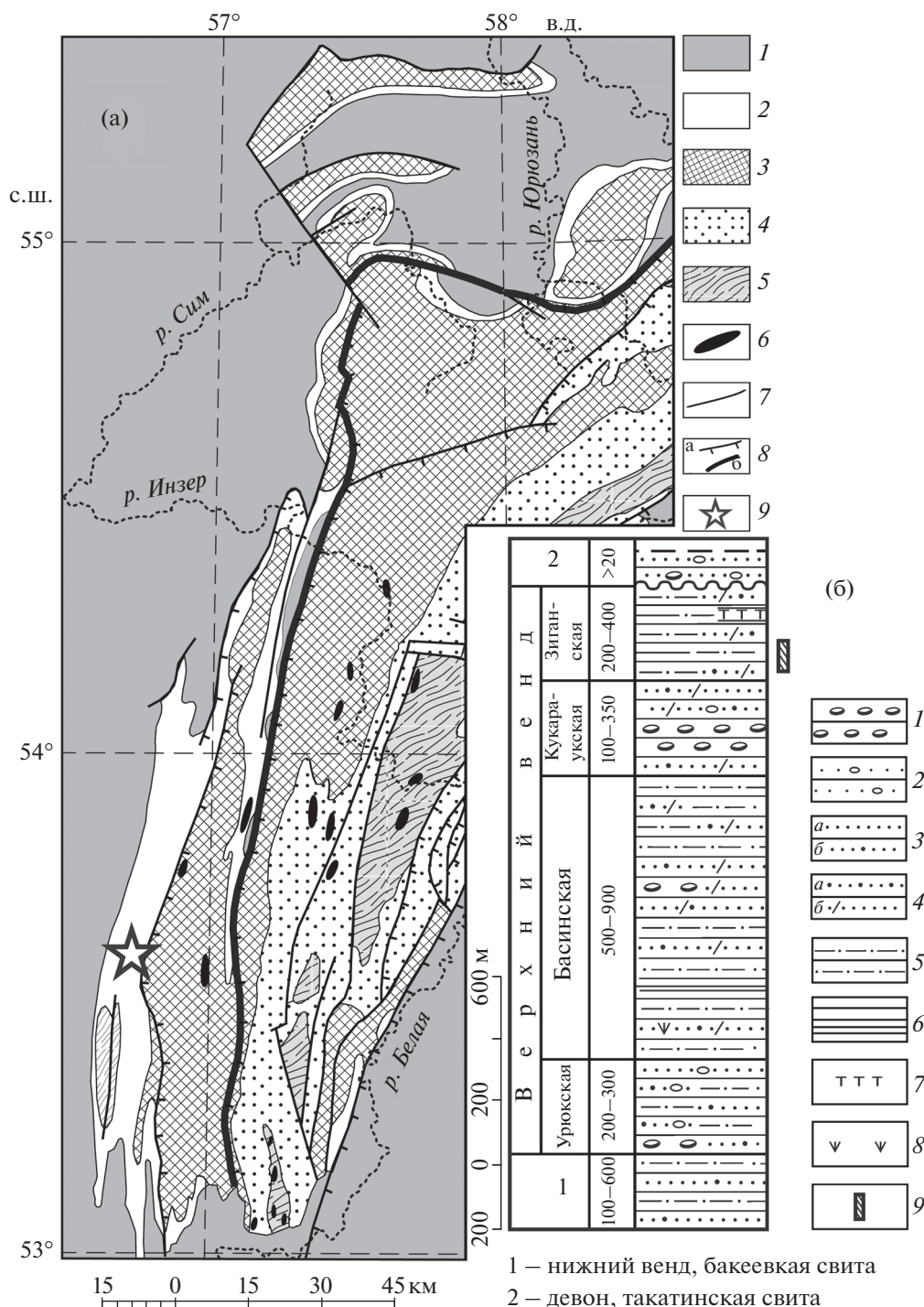


Рис. 1. (а) – Схематическая геологическая карта докембрийских отложений (а): 1 – палеозой; 2 – венд; 3 – 5 – рифей (3 – верхний, 4 – средний, 5 – нижний); 6 – интрузии; 7 – геологические границы; 8 – разрывные нарушения (а – на-
двиги, толстая линия соответствует Зильмердакскому надвику, к западу от которого нет углового несогласия между
вендскими и палеозойскими отложениями; б – прочие разломы); 9 – местоположение изученного разреза (по работе
[Геологическая..., 2002]); (б) – стратиграфическая колонка ашинской серии венда Башкирского мегантиклинория,
Южный Урал: 1 – конгломераты; 2–4 – песчаники (2 – гравийные; 3 – кварцевые (а), полевошпат-кварцевые (б)); 4 –
аркозовые (а), полимиктовые (б)); 5 – алевролиты; 6 – аргиллиты; 7 – туфы; 8 – глауконит; 9 – изученный фрагмент
разреза зиганской свиты (по работе [Геологическая..., 2002]).

В изученном разрезе в составе пород преобладают алевролиты и аргиллиты, количественное соотношение которых приблизительно равное, песчаники имеют подчиненное значение. Песчаники полимиктовые, реже кварцевые, разномышечные, зеленовато- и розовато-серые, слоистые, слабоизвестковистые, разноплитчатые содержат прослои алевролитов того же состава и облика. Нередко в породах наблюдаются косая слоистость, волновые знаки ряби и текстуры струйчатых течений. В основании разреза зиганской свиты и вблизи ее верхней границы с кварцевыми светло-серыми песчаниками такатинской свиты эмского яруса нижнего девона среди аргиллитов отмечены прослои туфов. Падение слоистости пород зиганской свиты и их мощность (460 м) в разрезе на участке автодороги с. Макарово—с. Кулгунино такое же, как в стратотипе по р. Зиган. Отложения свиты с постепенным переходом залегают на подстилающих образованиях куккараукской свиты, красочные полимиктовые конгломераты в средней части которой являются маркирующим горизонтом, позволяющим отделять комплексы зиганской свиты от комплексов нижележащей басинской свиты. Литологически эти две свиты очень похожи, и в обнажениях, где конгломераты куккараукской свиты отсутствуют, различить их не представляется возможным. Это обстоятельство позволило зиганскую свиту (район г. Усть-Катав) с датировкой 548.2 ± 7.6 млн лет по циркону из туфового прослоя [Гражданкин и др., 2011] рассматривать в составе нижележащей басинской свиты. В настоящее время по циркону из пепловых туфов басинской свиты рассматриваемого разреза получен возраст 573.0 ± 2.3 млн лет U—Pb методом (SHRIMP-II) [Разумовский и др., 2019], а датировка 548.2 ± 7.6 млн лет, по мнению авторов, определяет возраст осадков зиганской свиты.

Пологое (угол падения пород 10° — 20°) моноклинальное залегание пород зиганской свиты и максимальная мощность осадков в изученном разрезе, отсутствие брекчированности и других признаков деформации пород, а также наличие постепенного перехода с подстилающими образованиями куккараукской свиты свидетельствуют о достаточно спокойном тектоническом режиме и отсутствии перерывов в период накопления осадков зиганской свиты и правомерности использования разреза для циклостратиграфического изучения.

МЕТОДИКА ЦИКЛОСТРАТИГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Калибровка био-, хемо-, магнитостратиграфических шкал во времени путем их увязки с астрономическими циклами на сегодня является одной из главных тенденций развития международной

шкалы геологического времени. Циклостратиграфический метод заключается в использовании обладающих известной периодичностью астрономических циклов для датирования и интерпретации осадочной летописи. Наиболее важными из таких циклов являются циклы Миланковича (циклы прецессии, нутации и эксцентриситета), возникающие в результате периодических изменений орбиты Земли и оси ее вращения. Эти циклы имеют периоды от 20 до 400 тыс. лет. Благодаря связи между инсоляцией Земли и астрономическими характеристиками, циклы Миланковича воплощаются в климатические, океанографические и биологические флуктуации, которые потенциально могут регистрироваться в геологической летописи.

Анализ осадочных отложений (ритмичность слоистости, изменения фаций, изменения состава фоссилий, химического и минералогического состава, изменения магнитной восприимчивости пород) позволяет идентифицировать орбитальные циклы. Существует ряд работ, в которых показана устойчивость этих циклов в прошлом и приводятся методики расчета отношений периодов циклов Миланковича в геологическом прошлом [Waltham, 2015; Berger et al., 1994]. В данной работе для выявления орбитальной цикличности была выбрана магнитная восприимчивость пород. Сравнение спектральных характеристик временного ряда петромагнитных параметров (вариации магнитной восприимчивости по разрезу) и модельной кривой инсоляции позволяет выделить в первой периоды, которые можно сопоставить с циклами Миланковича различного порядка.

Используемый в этой работе подход циклостратиграфической калибровки магнитостратиграфической шкалы имеет достаточно хорошо разработанную методическую базу (см., напр., [Kodama, Hinnov, 2015]). Кривую изменения магнитной восприимчивости по разрезу можно представить как суперпозицию циклического сигнала и шума. В таком случае решение обратной задачи сводится к выявлению в природном сигнале периодических вариаций и оценке их достоверности по отношению к шуму. Спектральный анализ изменений магнитной восприимчивости по разрезу позволяет выделить на периодограмме отчетливые пики, которые сопоставляются с орбитальными циклами. На основе выявленных циклов Миланковича можно оценить длительность накопления изученной толщи и среднюю продолжительность одной магнитозоны.

На самом длинном непрерывно обнаженном участке среди всех разрезов зиганской свиты, представленных в работе [Bazhenov et al., 2016] (рис. 1), мощность которого составляет 74 м, через каждые 20 см было отобрано 364 неориентированных образца для послойного измерения

Таблица 1. Сравнение периодов циклов, выявленных по результатам анализа значений магнитной восприимчивости зиганской свиты с модельными циклами Миланковича на конец эдиакария

Периоды, выделяемые на периодограмме кривой МВ зиганской свиты			Интерпретируемые циклы Миланковича	Циклы Миланковича, рассчитанные на 550 млн лет назад [Waltham, 2015]	
Частота (циклов/метр)	Период, м	Отношение		отношение	период, тыс. лет
0.05	18.60	1	LE	1	405
не проявлен			SE	4.3	94.9
0.62	1.62	11.45	O	11.2–14.7	27.6–36.2
0.74	1.34	13.85			
1.00	1.00	18.65	P	18.4–26.1	15.5–22.0
1.09	0.92	20.20			
1.12	0.90	20.75			

Примечание: МВ – магнитная восприимчивость, LE – длинный эксцентриситет, SE – короткий эксцентриситет, O – нутация, P – прецессия.

магнитной восприимчивости. По отобранным образцам измерена величина магнитной восприимчивости (МВ), нормированная на массу. Измерения магнитной восприимчивости выполнялись на Каппабридже MFK1-FA (Чехия) в лаборатории главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН (Москва). Таким образом была получена кривая изменений магнитной восприимчивости по разрезу (рис. 2а). Спектральный анализ полученной кривой выполнен в программе Acycle v.2.0 [Li et al., 2019]. Важными критериями при спектральном анализе являются равномерность временных интервалов между точками данных и отсутствие значимых разрывов (пропусков). Литологическая однородность разреза и отсутствие видимых перерывов, а также смены фаций позволяют выполнить это условие.

При подготовке к анализу данных для устранения экстремальных выбросов значений применено осреднение данных скользящим средним по трем точкам (рис. 2а). Возможное влияние изменений с длинами волн, сравнимых с длиной разреза, устраняется применением процедуры детрендинга методом LOESS с окном длиной в $\frac{2}{3}$ изучаемой последовательности (рис. 2б). Для временного ряда, полученного вычитанием долгопериодного тренда из каждого значения (рис. 2в), выполнен спектральный анализ методом MTM (multitaper method) [Thomson, 1982]. Оценка достоверности выявленных пиков выполнена на фоне робастной авторегрессионной модели шума [Mann, Lees, 1996] и выражена на периодограмме в уровнях доверия (95 и 99%).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На полученной периодограмме (рис. 3) выделяются достоверные циклы с периодами 18.6, 1.62, 1.34, 1.14, 1.00, 0.92 и 0.90 м которые соотносятся между собой как 1 : 11.46 : 13.85 : 16.25 : 18.65 : 20.20 : 20.75 соответственно (табл. 1). Согласно расчетной модели соотношений циклов Миланковича для конца эдиакария [Waltham, 2015], эти пики могут быть проинтерпретированы как проявления циклов длинного эксцентриситета (LE), нутации (O) и прецессии (P). В теории орбитальных циклов наиболее стабильными (обладающими устойчивым периодом в прошлом) являются циклы эксцентриситета (405 тыс. лет). Исходя из результатов циклостратиграфического анализа можно рассчитать длительность формирования изученного разреза как 405 тыс. лет $\times$ (74 м/18.6 м) = 1611 тыс. лет.

Итак, циклостратиграфический анализ вариаций магнитной восприимчивости показал, что в изученном разрезе наблюдаются циклические вариации с различными периодами, и их можно сопоставить с циклами Миланковича (рис. 3). Рассчитанная на основе выявленных циклов Миланковича длительность накопления опробованной толщи составила около 1.6 млн лет, а средняя продолжительность одной зоны магнитной полярности – около 80 тыс. лет.

Согласно нашей интерпретации, наиболее “короткие” устойчивые циклы соответствуют циклам прецессии, а значит погрешность определения длительности формирования отложений зиганской свиты составляет не более половины прецессионного цикла, то есть 10–12 тыс. лет.

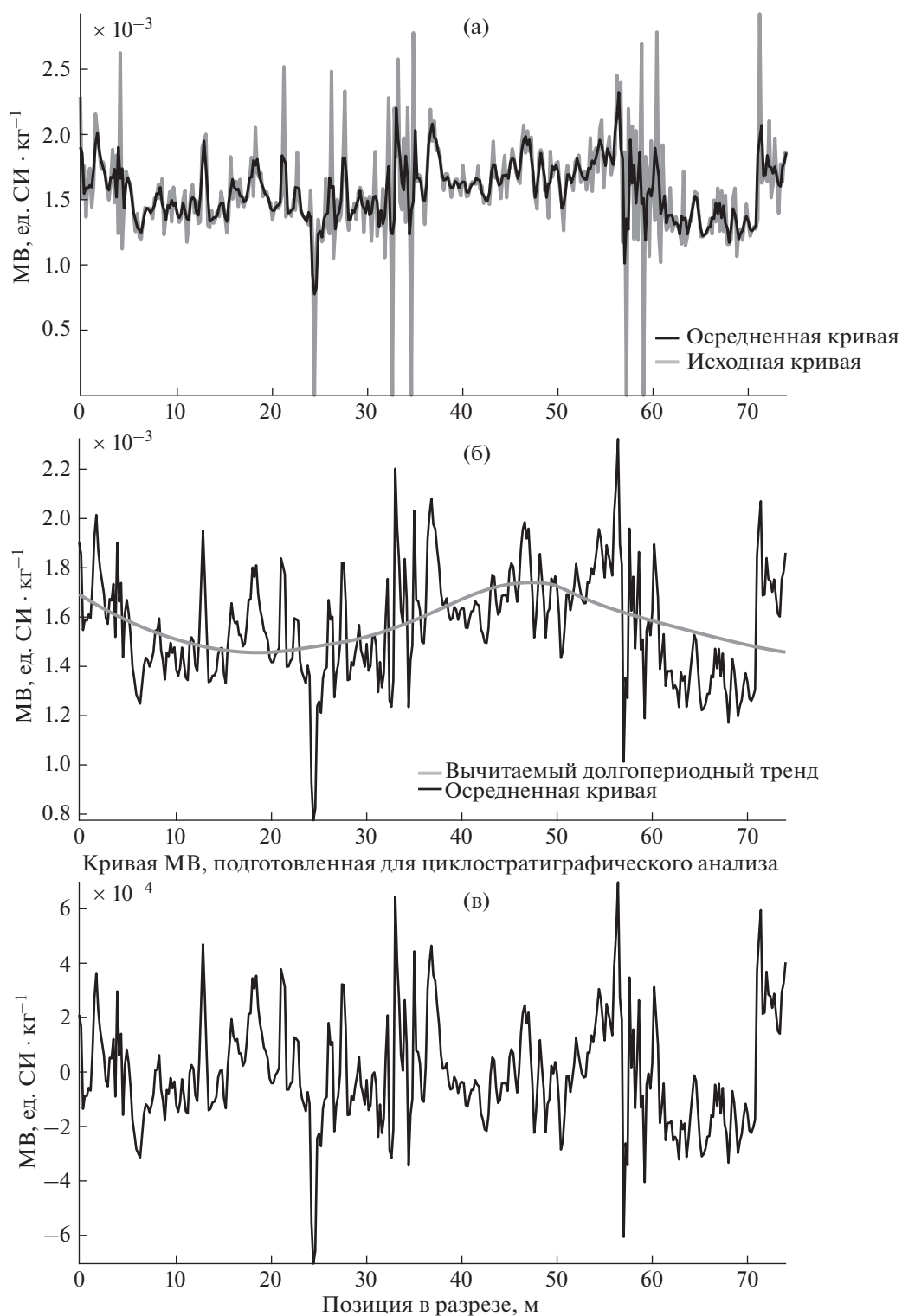


Рис. 2. Процедура подготовки исходной кривой магнитной восприимчивости для циклостратиграфического анализа: (а) — осреднение скользящим средним по трем точкам; (б) — долгопериодный тренд; (в) — результат вычитания тренда из исходной кривой, осредненной скользящим средним.

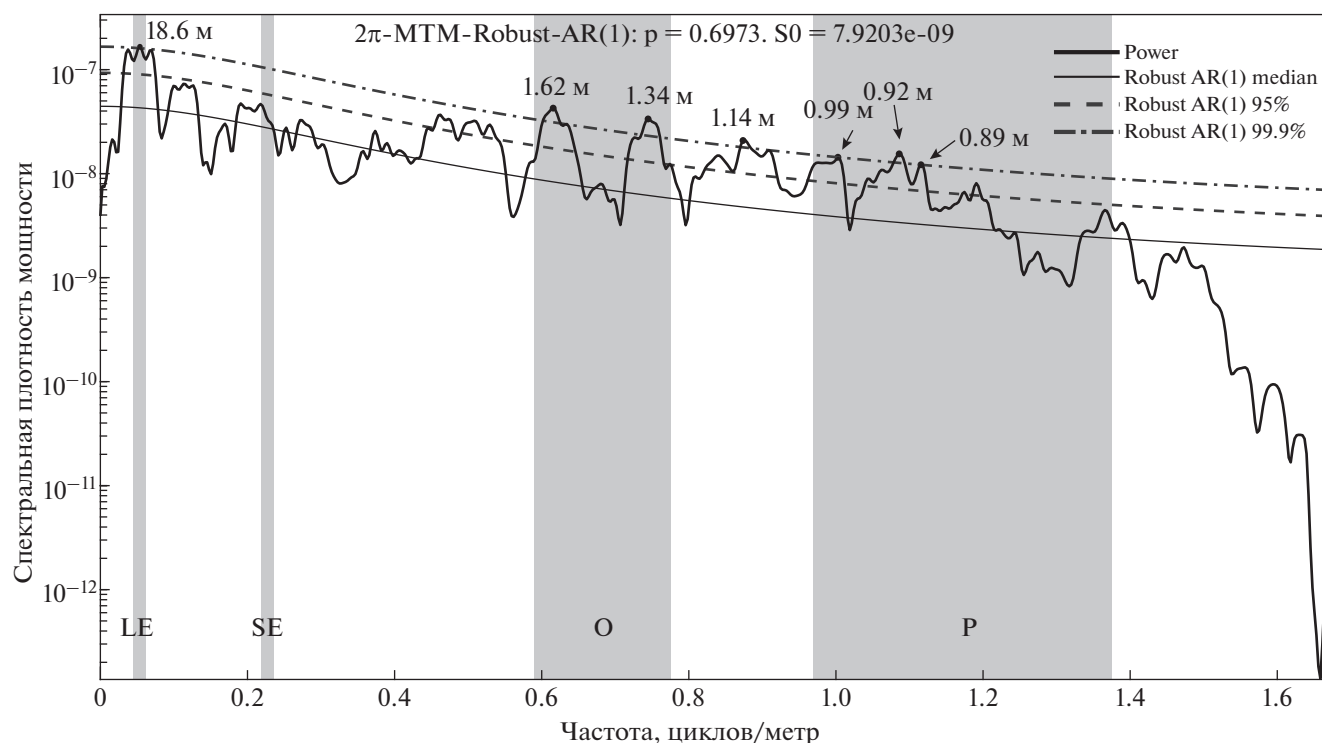


Рис. 3. Периодограмма кривой магнитной восприимчивости (МВ) зиганской свиты, полученная по методу МТМ (multitaper method). Серые области – ожидаемые частоты проявления циклов Миланковича: LE – длинный эксцентриситет, SE – короткий эксцентриситет, O – нутация, P – прецессия. Пунктирными линиями показаны доверительные уровни отличия от модели шума.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение результатов циклостратиграфических исследований с магнитостратиграфической колонкой (рис. 4), полученной в работе [Bazhenov et al., 2016] дало возможность более достоверно оценить частоту инверсий в изученном интервале. Получилось, что изученный разрез, в котором было найдено 20 инверсий, накапливался в течение 1.6 млн лет, то есть частота инверсий в этом интервале времени составляет 12–13 инверсий за млн лет. Правда, на некоторой части разреза палеомагнитные данные получить не удалось (рис. 4). Если во время накопления пропущенных участков и были инверсии, выяснить это невозможно. Полученные количественные оценки показывают, что в работе [Bazhenov et al., 2016] предполагаемая частота инверсий примерно вдвое завышена. Уточненная частота инверсий остается аномально высокой, но уже не столь далека от верхней границы максимальной модельной частоты инверсий в фанерозое [Biggin et al., 2012]. Таким образом, после проведения циклостратиграфических исследований мы все-таки можем утверждать, что в конце эдиакария, 547.6 ± 3.8 млн лет назад, был период с аномально высокой частотой инверсий, или период гиперактивности магнитного поля.

Отметим, что для построения колонки, приведенной в работе [Bazhenov et al., 2016], использованы данные, полученные при палеомагнитном изучении разреза. Основной задачей было определение палеополюса по породам зиганской свиты. Отбор образцов был неравномерным по разрезу и недостаточным для построения детальной магнитостратиграфической колонки. Однако даже такой отбор образцов позволил выявить очень большое количество инверсий магнитного поля, хотя некоторые из них выделены только по одному образцу. Приведенную колонку следует рассматривать как первое приближение, позволившее обнаружить аномально высокую частоту инверсий и говорить о гиперактивном состоянии магнитного поля. Полученные тогда результаты стимулировали попытки точнее определить длительность магнитозон. С учетом изложенного корректнее говорить, что в данной работе выполнена оценка минимальной частоты инверсий на исследуемом интервале геологического времени. Возможно, в дальнейшем удастся детализировать магнитостратиграфическую колонку и выявить новые инверсии.

Какие последствия может вызвать столь высокая частота инверсий? Существует предположение, что процесс инверсии геомагнитного поля

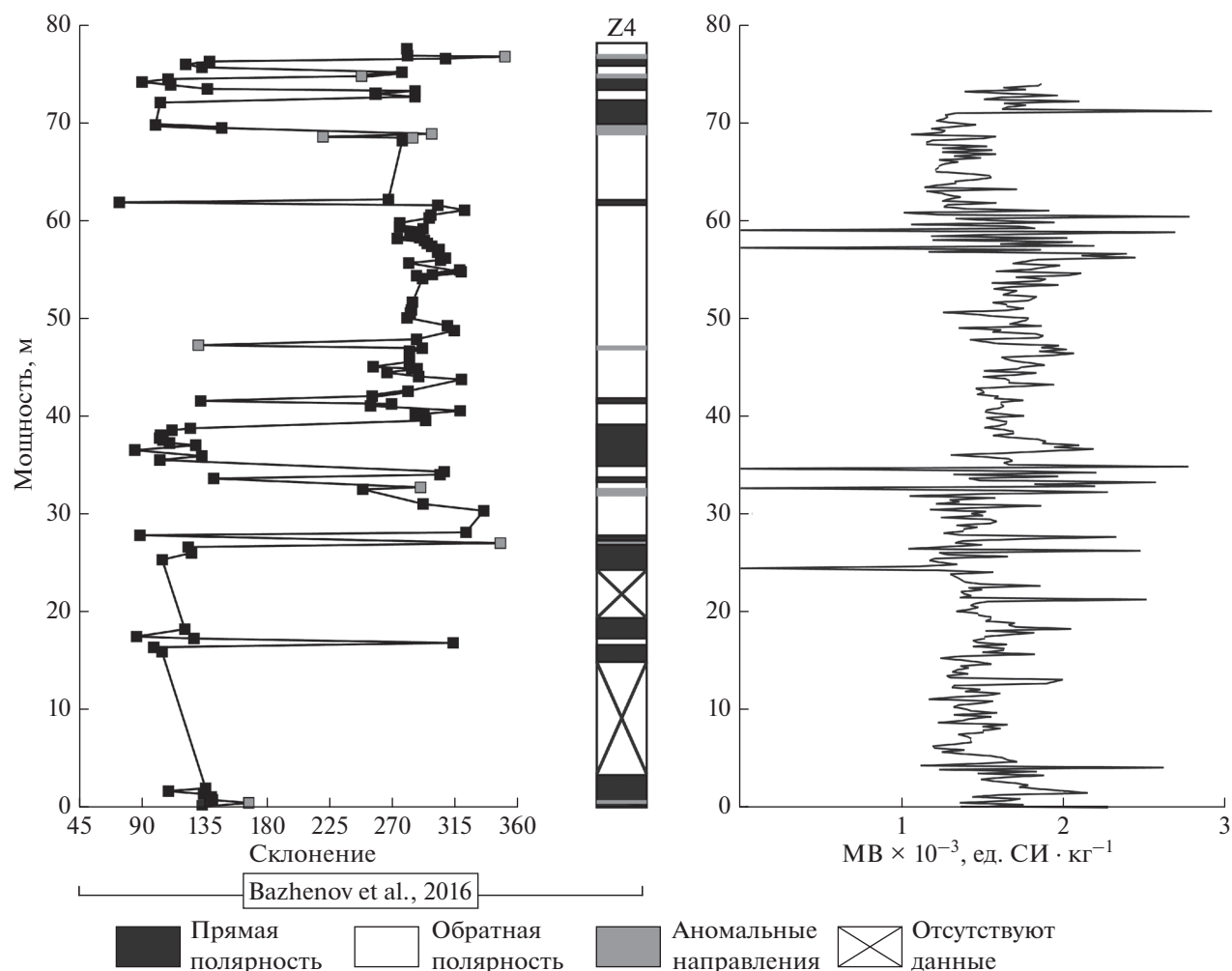


Рис. 4. Сравнение магнитостратиграфической и циклостратиграфической колонок.

длится от 5 до 10 тыс. лет [Merrill et al., 1996; Clement, 2004]. В процессе инверсии вклад дипольной составляющей в магнитное поле Земли становится на порядок меньше, чем в квазистабильном состоянии. В это время вклад квадрупольной и октупольной компонент магнитного поля превышает вклад дипольной составляющей и, соответственно, интенсивность поля падает, предположительно, в 10 и более раз [Biggin et al., 2012; Valet et al., 2005; Tauxe et al., 2013]. Если в изученном интервале времени за миллион лет происходило около 12–13 инверсий, то 10–15% всего времени пришлось на процесс инверсий, а значит средняя интенсивность магнитного поля Земли для этого времени намного ниже обычной.

Магнитопауза – это теоретическая граница, на которой давление магнитного поля Земли равно давлению окружающей магнитосферу плазмы. Когда поле находится в квазистабильном состоянии, эта граница, создающая барьер для приходящего космического излучения, проходит пример-

но на расстоянии 10 радиусов Земли. Однако во время инверсии это расстояние может уменьшаться до 1.3–1.8 радиусов Земли [Wei et al., 2014], и поток космического излучения, достигающего верхней части атмосферы, резко увеличивается из-за потери защиты [Shea, Smart, 2004; Vogt et al., 2007]. При таком усилении облучения атмосферы в 3–4 раза увеличивается количество ионизированных частиц кислорода, которые могут уходить в межпланетное пространство [Wei et al., 2014]. Увеличение потока озона, который покидает атмосферу во время инверсии, определяется целым рядом факторов, и оценка этого процесса является отдельным предметом исследования. В первом приближении можно сказать, что истощение озонового слоя во время инверсии может достигать 30% [Winkler et al., 2008; Vogt et al., 2007]. А снижение уровня озона на 10–30% может привести к значительному нарушению жизнедеятельности живых организмов, подверженных воздействию повышенного потока УФ-излучения.

Даже такое увеличение потока солнечной радиации на поверхности Земли меняет эволюционную стратегию населявших мелководные моря организмов, заставляя их вырабатывать механизмы “бегства” (вертикальная миграция, зарывание в ил, наращивание раковины), и способствует их быстрой диверсификации. Одновременно происходит более или менее масштабное вымирание той части биоты, которая не сумела выработать новую эволюционную стратегию.

Кембрийский взрыв биоразнообразия произошел примерно 542 млн лет назад. Ему предшествовал “котлинский кризис” (550–542 млн лет (?)), когда произошло несколько эпизодов вымирания биоты. Эти вымирания дали возможность быстрой диверсификации и распространения новых видов организмов [Phoenix et al., 2001; Sigg et al., 2007; Bebout, Garcia-Pichel, 1995; Häder et al., 2007].

Причины вымираний и радикального преобразования биосферы в это время являются предметом огромного количества исследований. В 2016 г. Дж. Меерт с соавторами [Meert et al., 2016] предположили, что период гиперактивности магнитного поля около 550 млн лет назад мог послужить триггером для начала “котлинского кризиса”. Гипотеза смелая, но как оценить ее правдоподобность, если авторам [Meert et al., 2016] был известен только один эпизод гиперактивности магнитного поля? Более или менее объективно оценить каков вклад этого явления в эволюцию биосферы можно будет, только когда появятся данные по нескольким периодам гиперактивности магнитного поля.

Только в 2019 г. появилась работа [Gallet et al., 2019], где авторы представили данные о том, что в Сибири, на реке Хорбусуонка, ими был изучен разрез красноцветов майского яруса (500–504 млн лет). Частота инверсий там составляет 26 за 1 млн лет. Сколько-нибудь надежных обоснований длительности накопления изученного разреза у авторов нет, но все равно эти исследования дают веские основания предполагать, что в среднем кембрии также имел место период гиперактивности поля. Период гиперактивности был, а вот сколько-нибудь значимого вымирания биоты в майском ярусе не отмечается. Это заставляет задуматься о том, так ли значимы периоды гиперактивности магнитного поля для эволюции биосферы, как предполагают авторы работы [Meert et al., 2016], и свидетельствует о необходимости дальнейшего изучения поведения магнитного поля в периоды гиперактивности, причин и следствий этого явления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение результатов проведенных детальных циклостратиграфических исследований

нижней красноцветной части (74 м) самого протяженного непрерывного разреза зиганской свиты на автодороге Стерлитамак–Магнитогорск, с магнитостратиграфической колонкой, полученной для этого разреза в работе [Bazhenov et al., 2016], дало возможность более достоверно оценить частоту инверсий в изученном интервале времени. Изученный разрез, в котором было найдено 20 инверсий, предположительно накапливался в течение 1.6 млн лет, то есть частота инверсий в этом интервале времени составляет 12–13 инверсий за миллион лет. Полученные количественные оценки показывают, что в работе [Bazhenov et al., 2016] предполагаемая частота инверсий завышена примерно вдвое. Однако и такую частоту инверсий можно считать аномально высокой и вывод о том, что в конце эдиакария, 547.6 ± 3.8 млн лет назад, был период с аномально высокой частотой инверсий, можно считать подтвержденным.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Эта работа выполнялась на средства РФФИ, грант № 18-05-00631, материалы по геологии западной части Южного Урала собраны и обобщены в рамках темы государственного задания № 0246-2019-0087.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы признательны В.Э. Павлову и В.П. Щербакову за их комментарии, которые оказались очень полезными при подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беккер Ю.Р. Молассы докембрия. Л.: Недра. 1988. 288 с.
- Геологическая карта Российской Федерации и сопредельной территории республики Казахстан. Масштаб 1 : 1000000 (новая серия). Лист №-40(41) / Отв. ред. Козлов В.И. Уфа, СПб: ВСЕГЕИ. 2002.
- Гражданкин Д.В., Марусин В.В., Меерт Дж., Крупенин М.Т., Маслов А.В. Котлинский горизонт на Южном Урале // Докл. РАН. 2011. Т. 440. № 2. С. 201–206.
- Павлов В.Э., Галле И., Шацилло А.В., Водовозов В.Ю. Палеомагнетизм нижнего кембрия долины нижнего течения р. Лена — новые ограничения на кривую кажущейся миграции полюса Сибирской платформы и аномальное поведение геомагнитного поля в начале фанерозоя // Физика Земли. 2004. № 2. С. 28–49.
- Пучков В.Н., Сергеева Н.Д., Карасева Т.В. Сводный литолого-стратиграфический разрез и оценка перспектив нефтегазоносности отложений верхнего докембрия Волго-Уральской области. Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: Материалы и доклады. 11-я Межрегиональная научно-практическая конференция, посвященная 65-летию Института геологии УНЦ РАН, Уфа, 17–19 мая 2016 г. / Под ред. Пучкова В.Н. Уфа: ДизайнПресс. 2016. С. 64–73.

- Разумовский А.А., Новиков И.А., Рудько С.В., Кузнецов Н.Б., Яшунский Ю.В. U—Pb изотопный возраст пепловых туфов поздневендской басинской свиты (ашинская серия, Южный Урал). Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики. Т. 2. Материалы LI Тектонического совещания. М.: ГЕОС. 2019. С. 219–224.
- Bazhenov M.L., Levashova N.M., Meert J.G., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M. Late Ediacaran magnetostratigraphy of Baltica: evidence for magnetic field hyperactivity? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2016. V. 435. P. 124–135.
- Bebout B.M., Garcia-Pichel F. UV B-induced vertical migrations of cyanobacteria in a microbial mat // *Appl. Environ. Microbiol.* 1995. V. 61. № 12. P. 4215–4222.
- Berger A., Loutre M.-F. Astronomical forcing through geological time. Orbital forcing and cyclic sequences / P. DeBoer, D.G. Smith (Eds.). Oxford: Blackwell Scientific Publications. 1994. V. 19. P. 15–24.
- Biggin A.J., Steinberger B., Aubert J., Suttie N., Holme R., Torsvik T.H., van der Meer D.G., van Hinsbergen D.J.J. Possible links between long-term geomagnetic variations and whole-mantle convection processes // *Nat. Geosci.* 2012. V. 5. № 8. P. 526–533.
- Clement B.M. Dependence of the duration of geomagnetic polarity reversals on site latitude // *Nature.* 2004. V. 428. P. 637–640.
- Doglioni C., Pignatti J., Coleman M. Why did life develop on the surface of the Earth in the Cambrian? // *Geosci. Front.* 2016. V. 7. № 6. P. 865–873.
- Duan Z., Qingsong L., Shoumai R., Lihui L., Xiaolong D., Jianxing L. Magnetic reversal frequency in the Lower Cambrian Niutitang Formation, Hunan Province, South China // *Geophys. J. Int.* 2018. V. 214. № 2. P. 1301–1312.
- Gallet Y., Pavlov V., Korovnikov I. Extreme geomagnetic reversal frequency during the Middle Cambrian as revealed by the magnetostratigraphy of the Khorbusuonka section (northeastern Siberia) // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2019. V. 528. № 115823. P. 1–12.
- Geyer G., Landing E. The Precambrian–Phanerozoic and Ediacaran–Cambrian boundaries: a historical approach to a dilemma // *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* 2017. V. 448. № 1. P. 311–349.
- Gradstein F., Ogg J., Schmitz M., Ogg G. The Geologic Timescale 2012. Amsterdam: Elsevier. 2012. 1176 p.
- Häder D.-P., Kumar H.D., Smith R.C., Worrest R.C. Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change // *Photochem. Photobiol. Sci.* 2007. V. 6. № 3. P. 267–285.
- Halls H.C., Lovette A., Hamilton M.A., Söderlund U. A paleomagnetic and U—Pb geochronology study of the western end of the Grenville dyke swarm: rapid changes in paleomagnetic field direction at ca. 585 Ma related to polarity reversals? // *Precambrian Res.* 2015. V. 257. P. 137–166.
- Iglesia Llanos M.P., Tait J.A., Popov V., Abalmassova A. Palaeomagnetic data from Ediacaran (Vendian) sediments of the Arkhangelsk region, NW Russia: An alternative apparent polar wander path of Baltica for the Late Proterozoic–Early Palaeozoic // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. V. 240. P. 732–747.
- Kodama K.P., Hinnov L.A. Rock magnetic cyclostratigraphy. John Wiley & Sons. 2015. 165 p.
- Landing E., Antcliffe J.B., Geyer G., Kouchinsky A., Bowser S.S., Andreas A. Early evolution of colonial animals (Ediacaran Evolutionary Radiation–Cambrian Evolutionary Radiation–Great Ordovician Biodiversification Interval) // *Earth-Sci. Rev.* 2018. V. 178. P. 105–135.
- Levashova N.M., Bazhenov M.L., Meert J.G., Kuznetsov N.B., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M. Paleogeography of Baltica in the Ediacaran: paleomagnetic and geochronological data from the clastic Zigan Formation, South Urals // *Precambrian Res.* 2013. V. 236. P. 16–30.
- Li M., Hinnov L., Kump L. Acycle: Time-series analysis software for paleoclimate research and education // *Comput. Geosci.* 2019. V. 127. P. 12–22.
- Liu A.G., Matthews J.J., McIlroy D., Narbonne G.M., Landing E., Menon L.R., Laflamme M. International Symposium on the Ediacaran–Cambrian Transition (ISECT) 2017. 15–29th June 2017. Newfoundland, Canada. 2018.
- Mann M.E., Lees J.M. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series // *Clim. change.* 1996. V. 33. № 3. P. 409–445.
- Meert J.G., Levashova N.M., Bazhenov M.L., Landing E. Rapid changes of magnetic field polarity in the late Ediacaran: Linking the Cambrian evolutionary radiation and increased UV-B radiation // *Gondwana Res.* 2016. V. 34. P. 149–157.
- Merrill R.T., McElhinny M.W., McFadden P.L. The Magnetic Field of the Earth. San Diego: Acad. Press. 1996. 527 p.
- Phoenix V.R., Konhauser K.O., Adams D.G., Bottrell S.H. Role of biomineralization as an ultraviolet shield: Implications for Archean life // *Geology.* 2001. V. 29. № 9. P. 823–826.
- Popov V., Iosifidi A., Khramov A., Tait J., Bachtdse V. Paleomagnetism of Upper Vendian sediments from the Winter Coast, White Sea region, Russia: Implications for the paleogeography of Baltica during Neoproterozoic times // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2002. V. 107. № 11. P. EPM 10-1-EPM10-8.
- Popov V.V., Khramov A.N., Bachtdse V. Palaeomagnetism, magnetic stratigraphy, and petromagnetism of the Upper Vendian sedimentary rocks in the sections of the Zolotitsa River and in the Verkhovina Hole, Winter Coast of the White Sea, Russia // *Russ. J. Earth Sci.* 2005. V. 7. № 2. P. 115–143.
- Shea M.A., Smart D.F. Preliminary study of cosmic rays, geomagnetic field changes and possible climate changes // *Adv. Space Res.* 2004. V. 34. № 2. P. 420–425.
- Sigg J.E., Lloyd-Knight K.M., Boal J.G. UV radiation influences covering behaviour in the urchin *Lytechinus variegatus* // *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 2007. V. 87. P. 1257–1261.
- Tauxe L., Gee J.S., Steiner M.B., Staudigel H. Paleointensity results from the Jurassic: New constraints from submarine basaltic glasses of ODP Site 801C // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2013. V. 14. № 10. P. 4718–4733.
- Thomson D.J. Spectrum estimation and harmonic analysis // *Proc. IEEE.* 1982. V. 70. № 9. P. 1055–1096.
- Valet J.P., Meynadier L., Guyodo Y. Geomagnetic dipole strength and reversal rate over the past two million years // *Nature.* 2005. V. 435. P. 802–805.
- Vogt J., Zieger B., Glassmeier K.H., Stadelmann A., Kallenrode M.B., Sinnhuber M., Winkler H. Energetic particles in the paleomagnetosphere: Reduced dipole configurations

and quadrupolar contributions // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2007. V. 112. P. 6216.

Waltham D. Milankovitch period uncertainties and their impact on cyclostratigraphy // *J. Sediment. Res.* 2015. V. 85. № 8. P. 990–998.

Wei Y., Pu Z., Zong Q., Wan W., Ren Z., Fraenz M., Hong M. Oxygen escape from the Earth during geomagnetic rever-

sals: Implications to mass extinction // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2014. V. 394. P. 94–98

Winkler H., Sinnhuber M., Notholt J., Kallenrode M.-B., Steinhilber F., Vogt J., Zieger B., Glassmeier K.-H., Stadelmann A. Modeling impacts of geomagnetic field variations on middle atmospheric ozone responses to solar proton-events on long timescales // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2008. V. 113. P. D02302.

Late Ediacaran Hyperactivity Period: Quantifying the Reversal Frequency

N. M. Levashova^{a,*}, I. V. Golovanova^{b,**}, D. V. Rud'ko^c, K. N. Danukalov^b,
S. V. Rud'ko^a, R. Yu. Sal'manova^b, and N. D. Sergeeva^b

^a*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

^b*Institute of Geology, Ufa Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, Ufa, 450077 Russia*

^c*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

*e-mail: namile2007@rambler.ru

**e-mail: golovanova@ufaras.ru

The previous paleomagnetic studies of sedimentary rocks of Upper Vendian Zigan Formation on the western slope of the Southern Ural revealed the presence of uncommonly numerous magnetic polarity zones (Bazhenov et al., 2016). The dating of magmatic zircons from the tuff interlayer determined the age of this formation to be 547.6 ± 3.8 Ma. The estimates based on most general considerations suggest the rate of reversals at about 20–30 per million years, which is approximately twice to thrice the highest reversal frequency established for the Phanerozoic. In this work, for more accurately estimating the rate of reversals, we carried out cyclostratigraphic study of the lower red-rock part (74 m) of the continuous section of the Zigan formation along the Sterlitamak–Magnitogorsk autoroad, which is the longest section of this formation among those previously studied by the paleomagnetic method. Based on correlating the results of the detailed cyclostratigraphic studies with the magnetostratigraphic column, we determined the rate of reversals more reliably. The studied section in which 20 reversals were identified was accumulated in 1.6 Myr, i.e., the reversal frequency during this interval was 12–13 reversals per Myr. The obtained quantitative estimates show that the geomagnetic reversal frequency assessed in the previous studies was overestimated by a factor of two. However, even this rate of reversals can be considered anomalously high and the conclusion that in the terminal Ediacaran, 547.6 ± 3.8 Ma ago, there was a period with anomalously high reversal frequency can be considered validated.

Keywords: paleomagnetism, cyclostratigraphy, magnetostratigraphy, South Urals, Upper Vendian, Zigan Formation