

УДК 550.384.5

DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-3-7>

КРАСНОЦВЕТНЫЕ ПЕСЧАНИКИ ЗИГАНСКОЙ СВИТЫ ВЕРХНЕГО ВЕНДА — УНИКАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ ПАЛЕОМАГНИТНОГО ИЗУЧЕНИЯ ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

© 2019 г. К. Н. Данукалов, Н. П. Парфирьев, И. В. Голованова,
Н. Д. Сергеева, Р. Ю. Сальманова

Реферат. В работе приведены результаты палеомагнитного изучения красноцветных песчаников нижней части зиганской свиты верхнего венда, ранее проводившегося авторами и другими исследователями с целью установления палеопозиции кратона Балтика в конце неопротерозоя. Лабораторные палеомагнитные исследования выполнены в соответствии с общепринятой в настоящее время методикой, включающей в себя температурную магнитную чистку и компонентный анализ выделенных направлений намагниченности. Приблизительно по 200 образцам удалось выделить биполярную высокотемпературную компоненту намагниченности, имеющую первичное происхождение, что подтверждается положительным тестом обращения и тестом регионального соответствия. Выделено более 20 инверсий геомагнитного поля в разрезе мощностью около 80 м. Такая сверхвысокая частота инверсий наблюдается всего лишь еще в двух верхневендских комплексах отложений на Земле. Приводится мнение Дж. Меерта с соавторами о возможном влиянии аномального состояния геомагнитного поля на последующую крупнейшую биосферную перестройку в истории Земли.

Ключевые слова: палеомагнетизм, высокотемпературная компонента намагниченности, диаграмма Зийдверельда, инверсия геомагнитного поля, венд, зиганская свита, Южный Урал

THE RED-COLORED SANDSTONES OF THE LATE EDIACARAN ZIGAN FORMATION — A UNIQUE OBJECT OF PALEOMAGNETIC STUDY OF THE EARTH'S HISTORY

© 2019 K. N. Danukalov, N. P. Parfir'ev, I. V. Golovanova,
N. D. Sergeeva, R. Yu. Sal'manova

Abstract. The paper presents the results of a paleomagnetic study of the red-colored sandstones of the lower part of the Late Ediacaran Zigan Formation, previously carried out by the authors and other researchers with the aim of establishing the paleoposition of the Baltic craton at the end of the Neoproterozoic. The laboratory paleomagnetic studies were carried out in accordance with the currently generally accepted methods, which includes thermal demagnetization and component analysis of selected directions of magnetization. For about 200 samples, it was possible to isolate the bipolar high-temperature magnetization component, which is of primary origin, as evidenced by a positive reversal test and a regional correspondence test. More than 20 inversions of the geomagnetic field were identified in the section with a thickness of about 80 m. Such an ultrahigh frequency of inversions is observed only in two other Late Ediacaran complexes of deposits on the Earth. The opinion of J. Meert et al. concerning a possible influence of the anomalous state of the geomagnetic field on the subsequent largest biosphere restructuring in the history of the Earth is given.

Key words: paleomagnetism, high-temperature component of magnetization, Zijderveld diagram, inversion of the geomagnetic field, Ediacaran, Zigan Formation, Southern Urals

Для цитирования: Данукалов К. Н., Парфирьев Н. П., Голованова И. В., Сергеева Н. Д., Сальманова Р. Ю. Красноцветные песчаники зиганской свиты верхнего венда — уникальный объект палеомагнитного изучения истории Земли // Геологический вестник. 2019. № 3. С. 93–102. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-3-7>.

For citation: Danukalov K. N., Parfir'ev N. P., Golovanova I. V., Sergeeva N. D., Sal'manova R. Yu. The red-colored sandstones of the Late Ediacaran Zigan formation — a unique object of paleomagnetic study of the Earth's history // *Geologicheskii vestnik*. 2019. No. 3. P. 93–102. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-3-7>.

Введение

На территории Ишимбайского района Республики Башкортостан находится очень интересный с точки зрения изучения истории Земли объект. Речь идет о красноцветных песчаниках нижней части зиганской свиты верхнего венда. Два разреза зиганских красноцветов расположены: на расстоянии 16 км от с. Макарово по новой дороге Стерлитамак–Белорецк и на р. Зиган приблизительно в 7 км выше по течению д. Гумерово (рис. 1). Чем обусловлен интерес палеомагнитологов к исследованию песчаников зиганской свиты? Изначально данный объект изучался с целью установления палеопозиции кратона Балтика в конце неопротерозоя [Levashova et al., 2013], что весьма важно для палеогеографии. В результате углубленных исследований удалось выделить биполярную высокотемпературную компоненту намагниченности, имеющую первичное происхождение, что подтверждается положительным тестом обращения и тестом регионального соответствия. Но самое главное, здесь наблюдается более 20 смен магнитной полярности в разрезе мощностью около 80 м [Vazhenov et al., 2016]. Подобная сверхвысокая частота инверсий наблюдается всего лишь еще в двух верхневендских комплексах отложений: на Зимнем берегу Белого моря [Роров et al., 2005] и в юго-восточной Сибири [Шацилло и др., 2015] и не является результатом перемагничивания или чрезвычайно медленного осаждения. Частота инверсий в позднем эдиакарии превысила 20 смен полярности на миллион лет. Можно предположить, что магнитное поле Земли в период гиперактивности ведет себя биполярным образом. Такая частая смена полярности интересна как сама по себе, в плане изучения поведения геомагнитного поля, но также натолкнула Дж.Меерта с соавторами [Meert et al., 2016] на предположение об одной из возможных причин последующего «кембрийского взрыва» фауны.

Геология

Зиганская свита завершает стратиграфическую последовательность отложений ашинской серии венда на Южном Урале. Отложения свиты развиты преимущественно в Алатауском антиклинории и Каратауском структурном комплексе Башкирского мегантиклинория на западном склоне Южного Урала (см. рис. 1).

Зиганская свита представлена песчаниками и алевролитами полимиктовыми, реже кварцевыми,

с прослоями и пачками аргиллитов, отмечаются единичные прослои (от 3–5 см до 30–40 см) вулканических туфов, возраст которых в районе г. Усть-Катав (U-Pb-метод по циркону) составил 547.6 ± 3.8 млн лет [Гражданкин и др., 2011].

С подстилающей куккараукской свитой зиганская связана постепенным переходом и с размывом перекрывается терригенными породами такатинской свиты эмского яруса нижнего девона. Мощность свиты изменяется от 350 до 460 м и колебания мощности обусловлены предпалеозойским размывом.

Стратотипическим для зиганской свиты является разрез по р. Зиган (N 53° 33.463', E 56° 39.599'), где свита представлена преимущественно песчаниками, меньше алевролитами, в подчиненном количестве присутствуют аргиллиты [Стратотип..., 1983]. Обнаженность отложений зиганской свиты в стратотипе недостаточная, а сам разрез труднодоступен для изучения и демонстрации. В настоящее время наиболее полный разрез зиганской свиты представлен в дорожных выемках по новой автодороге Стерлитамак–Белорецк на участке от с. Макарово до с. Кулгунино, проложенной в междуречье р. Зиган и р. Кукраук, приблизительно в 2 км севернее стратотипа (N 53° 34.353', E 56° 40.63') (см. рис. 1). Здесь в дорожных выемках вскрыты подстилающие зиганскую свиту отложения куккараукской свиты, представленные конгломератами полимиктовыми, разногальчными, с хорошо окатанной галькой преимущественно песчаников. Западнее куккараукских конгломератов через задернованный интервал (30 м по мощности) в дорожных выемках почти непрерывной полосой вскрыты породы зиганской свиты, но в отличие от стратотипа здесь меняется соотношение пород в переслаивании: преобладают алевролиты и аргиллиты, количественное соотношение которых приблизительно равное; песчаники имеют подчиненное значение. Среди аргиллитов в основании разреза зиганской свиты и вблизи верхней границы с кварцевыми светло-серыми песчаниками такатинской свиты нижнего девона отмечены прослои туфов (мощностью около 30–40 см). В нижней части разреза свиты (около 80 м по мощности) породы имеют зеленовато-серую и вишневою окраску, а выше по разрезу — исключительно серую, зеленовато-серую и темно-серую. Несмотря на значительные вариации в соотношении пород в переслаивании по площади распространения зиганской свиты, общий литолого-петрографический состав, структурно-текстурные особенности и внешний облик пород остаются неизменными. Следует отметить, что отложения

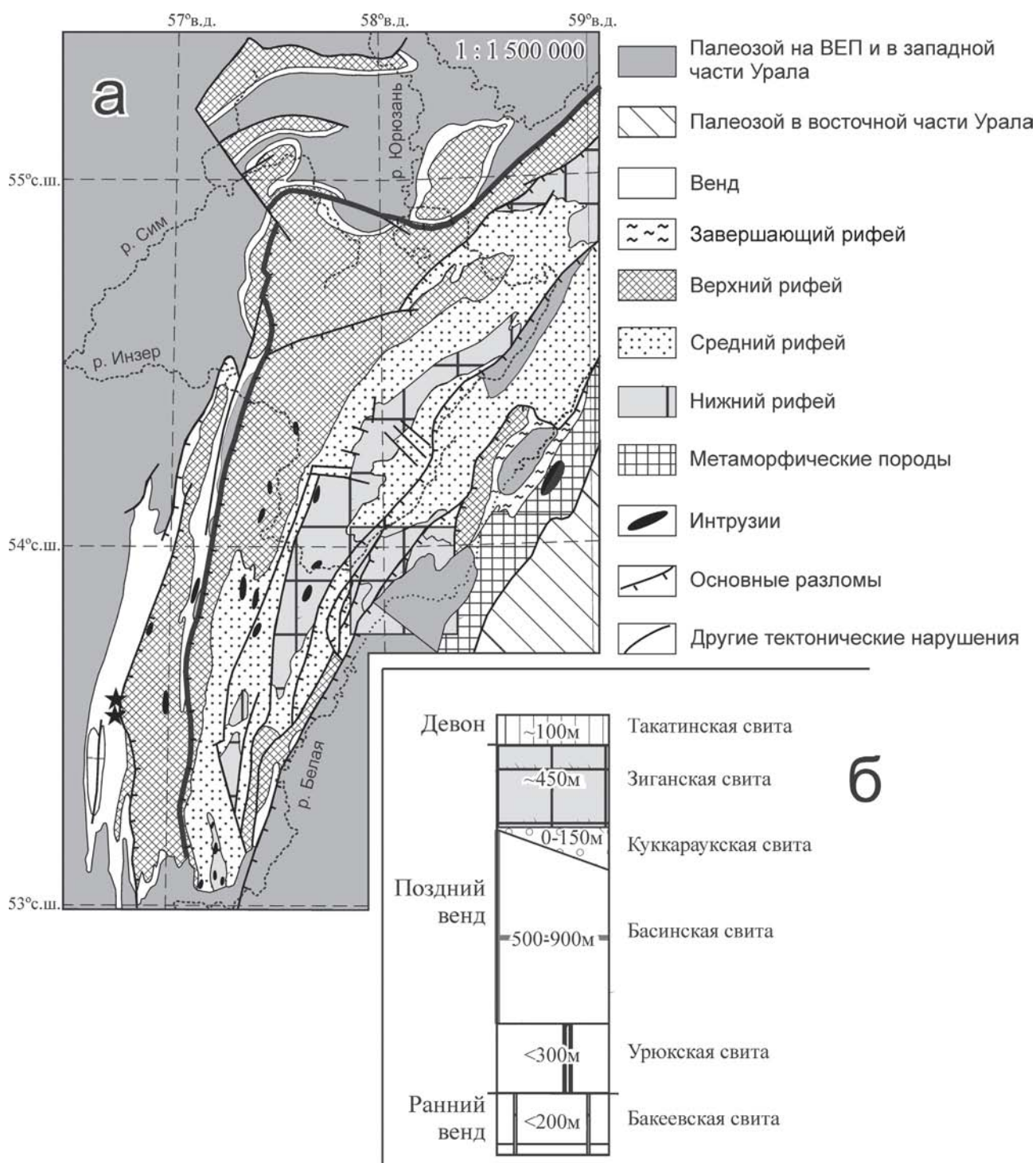


Рис. 1. Схематическая карта юго-западной части Урала (а) и упрощенная стратиграфическая колонка венда юго-западной части Урала (б)

Самая толстая линия обозначает зильмердакский разлом, к западу от которого вендские породы перекрыты палеозойскими без углового несогласия. Звездочками обозначено местоположение опробованных разрезов зиганской свиты.

Fig. 1. Schematic map of the SW Urals (а) and Simplified stratigraphic column of the Ediacaran sequence of the SW Urals (б)

The thickest line denotes the Zilmerdak Fault, to the west of which Ediacaran rocks are overlain by Paleozoic rocks without angular unconformity. Stars denote the localities, where the Upper Ediacaran Zigan Formation was sampled.

зиганской свиты по облику и составу сходны с осадками басинской свиты. В стратиграфически полных разрезах отложения этих свит разделены конгломератами куккараукской свиты. В том случае, когда отсутствует куккараукская свита (например: в Сулеймановской антиклинали северной части Башкирского мегантиклинория), различить литологически сходные отложения зиганской и басинской свит возможно лишь благодаря палеомагнитным данным [Levashova et al., 2013, 2015].

Методика

Всего было отобрано около 200 образцов из 2 разрезов общей мощностью чуть более 100 м. Отбор производился по стандартной методике с ориентировкой образцов при помощи горного компаса и последующей их распиловкой на кубики объемом 8 см³. Далее образцы изучались по общепринятой методике в палеомагнитных лабораториях Геологического Института РАН (г. Москва) и Института Геологии УФИЦ РАН (г. Уфа). Образцы, сгруппированные в сайты, поэтапно нагревали до 700°C либо в самодельных печах (г. Москва), либо с использованием термического размагничивающего устройства TD-48 фирмы ASC Scientific с внутренними остаточными полями <10 нТл (г. Уфа). Измерения проводились с помощью спиннер-магнитометров JR-4 или JR-6 фирмы «Agico» с уровнем шума 0.05 мА/м. Примерно 20% образцов коллекции были размагничены в обеих лабораториях и показали хорошую кучность (рис. 3), большинство выделенных компонент сходились в пределах 10°. Результаты размагничивания были нанесены на ортогональные векторные диаграммы Зийдервельда (рис. 2). Визуально идентифицированные линейные траектории были использованы для определения направлений магнитных компонент с помощью анализа главных компонент с использованием подгонки методом наименьших квадратов, включающей три или более этапа размагничивания [Kirschvink, 1980]. Статистические данные на уровне выборки использовались для расчета среднего и общего среднего направления естественной остаточной намагниченности. Для

анализа и построений использовалось программное обеспечение Р. Энкина [Enkin, 1994] и PaleoMac [Cogné, 2003].

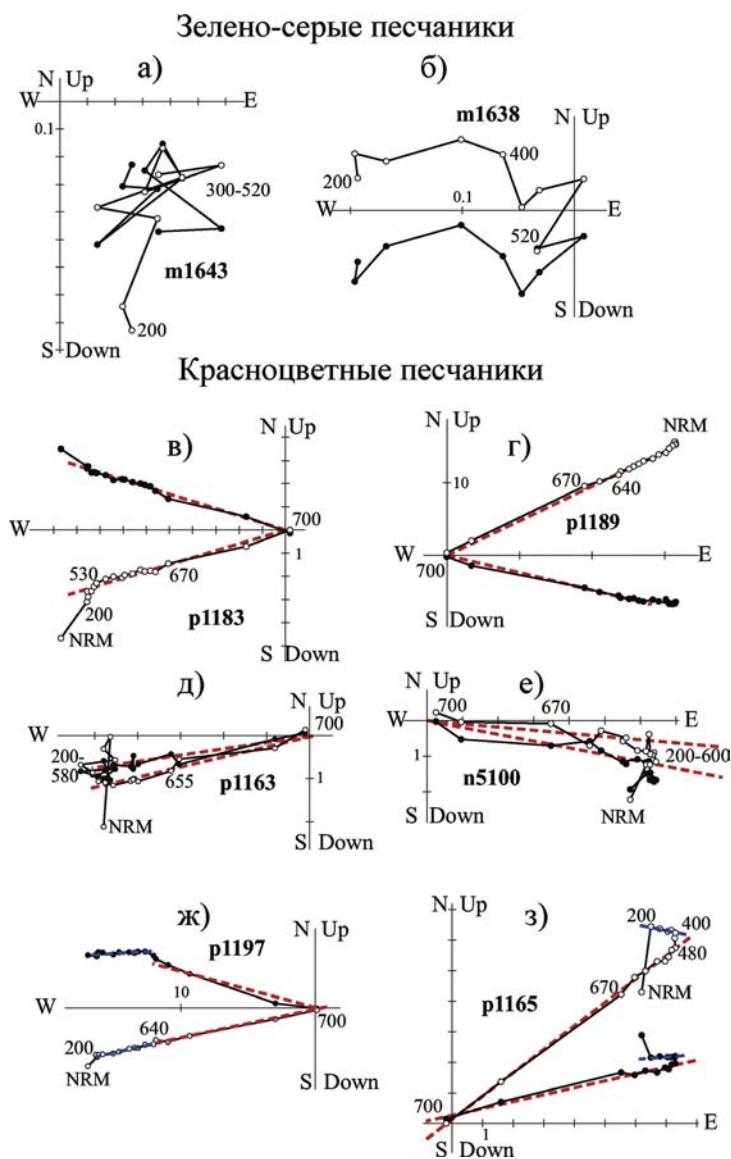


Рис. 2. Типичные кривые терморазмагничивания зеленовато-серых (а и б) и красноцветных (в–з) песчаников зиганской свиты в стратиграфической системе координат

Выделенные среднетемпературные (синие) и высокотемпературные (красные) компоненты обозначены толстыми пунктирными линиями. Температура приведена в градусах Цельсия. Интенсивность намагниченности в мА/м. Залитые (пустые) кружки представляют собой проекции на горизонтальную (вертикальную) плоскость (из [Levashova et al., 2013]).

Fig. 2. Representative thermal demagnetization plots of greenish-gray (a and б) and brown-gray and maroon (в–з) varieties of the Ediacaran Zigan Formation from the western part of the South Urals, in stratigraphic coordinates

Isolated intermediate- (blue) and high-temperature (red) components are denoted by thick dashed lines. Temperature steps are in degrees Celsius. Magnetization intensities are in mA/m. Full (open) circles represent vector endpoints projected onto the horizontal (vertical) plane (according to [Levashova et al., 2013]).

Результаты

При нагревании до 200–250 °С была удалена современная компонента намагниченности. При температуре выше 200 °С почти все зеленовато-серые образцы проявляют неустойчивое поведение и в них не удается выделить сгруппированную компоненту намагниченности (см. рис. 2 а, б). В отличие от них в красноцветных породах выделяется высокотемпературная компонента (ВТК) на-

магниченности, которая спадает в начало координат при 650–700 °С, но в некоторых образцах это происходит при 580 °С. Из этого следует, что основной носитель намагниченности — гематит, реже — магнетит (см. рис. 2 в–з). Направления ВТК достаточно хорошо сгруппированы как внутри сайтов, так и для всей коллекции.

Векторы ВТК на стереограмме в стратиграфической системе координат распределяются антиподально, что соответствует двум полярностям

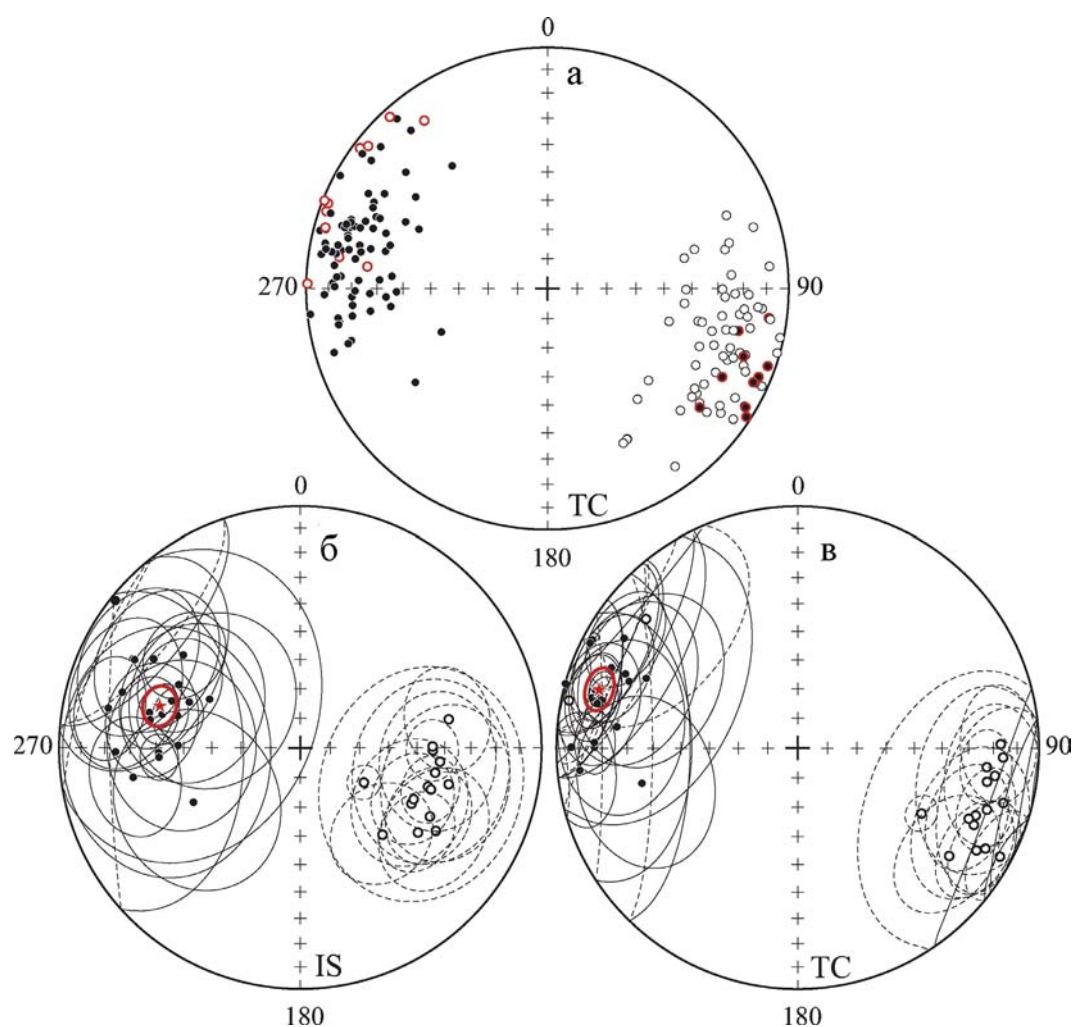


Рис. 3. Стереограммы высокотемпературной составляющей ВТК в верхневендских осадочных породах зиганской свиты

а — данные ВТК по образцам (кружки) после коррекции наклона. В каждой группе полярности аномальные значения наклонов выделены; б и в — направления (кружки) для сайтов и подсайтов с овалами доверия (тонкие линии) *in situ* (б) и после коррекции наклона (в). Звезды — это общие средние направления с соответствующими доверительными кругами (жирные линии). Залитые (полые) символы и сплошные (пунктирные) линии проецируются на нижнюю (верхнюю) полусферу (из [Levashova et al., 2013]).

Fig. 3. Stereoplots of high-temperature component, HTC, in the late Ediacaran clastic rocks of the Zigan Fm

а — sample HTC data (circles) after tilt correction. In each polarity group, directions with inclination that differs from that of main body of the data are highlighted; б and в — site and sub-site mean directions (circles) with associated confidence circles (thin lines) *in situ* (б) and after tilt correction (в). Stars are overall mean directions with associated confidence circles (thick lines). Full (open) symbols and solid (dashed and dotted) lines are projected onto lower (upper) hemisphere (according to [Levashova et al., 2013]).

(см. рис. 3). Из-за присущей неоднозначности в параметрах полярности (нормальная или обратная) можно условно назвать их: «ВП1» (вариант полярности 1; координаты полюса: $P_{lat} = 16^\circ N$, $P_{long} = 318^\circ E$) и «ВП2» (вариант полярности 2; $P_{lat} = 16^\circ S$, $P_{long} = 138^\circ E$). Угол $\gamma = 5.9^\circ$ между средними направлениями для двух групп из 83 «ВП1» и 72 «ВП2» векторов меньше критического угла, $\gamma_{крит} = 6.4^\circ$. Поэтому тест обращения на уровне выборки положительный (класс В) [McFadden, McElhinny, 1990]. Палеополус зиганской свиты с координатами $P_{lat} = 138^\circ N$, $P_{long} = 16^\circ E$ ($A_{95} = 4.6^\circ$) находится далеко от кривой кажущейся миграции полюса для фанерозоя Балтики [Torsvik et al., 2012], но согласуется с данными позднего эдиакария для беломорского региона [Роров et al., 2005]. Это, а также наличие в обоих случаях двойной полярности является подтверждением первичного происхождения ВТК для пород зиганской свиты.

В работах [Levashova et al., 2013; Голованова и др., 2017] приведены геологические и палеомагнитные доказательства когерентности западной части Южного Урала и кратона Балтика. В данной статье хотелось бы отметить их основные моменты, а именно геологическое обоснование, заключающееся в том, что неопротерозойские последовательности (~900–542 млн лет) надежно прослеживаются от складчатого пояса до платформы [Стратотип рифея, 1983; Maslov, 2004; Kuznetsov et al., 2010]; и не было найдено крупных угловых несогласий в интервале от эдиакария до середины перми в самых западных частях Южного Урала [Пучков, 2003]. Также было проведено палеомагнитное сравнение осредненных значений среднетемпературных компонент намагниченности из разных западноуральских разрезов с опорными направлениями, пересчитанными из кривой кажущейся миграции полюса Балтики для средней точки с координатами: $54^\circ N$, $57^\circ E$. Оказалось, что они очень хорошо согласуются для интервала от 300 до 270 млн лет, т.е. времени позднепалеозойского перемагничивания. Это подтверждает геологические данные и исключает возможность значительных относительных движений между западной зоной Южного Урала и кратоном Балтика.

Кроме обнаруженных двух групп полярности иногда выделяются и аномальные направления ВТК, отличающиеся от направлений для образцов как с «регулярными», так и с антиподальными направлениями. ВТК была преобразована в виртуальные геомагнитные полюсы, и был рассчитан общий средний полюс. После чего было получено

17 аномалий, отклоняющихся от среднего полюса более чем на 45° , что составляет около 10% от общего количества образцов с выделенной ВТК. Такие образцы были исключены из рассмотрения. Всего было обнаружено более 20 магнитозон на 80 м мощности в разрезе вдоль автодороги Макарово–Кулгунино (рис. 4). В разрезе на р. Зиган выделено еще более 10 инверсий на 30 м разреза, но сам разрез не непрерывный, и нет полной уверенности, что здесь нет частичного повторения разреза. Тем не менее на 110 м выделено более 30 магнитозон.

В принципе, такая частая смена полярности может быть связана с очень низкой скоростью осадконакопления. Однако М.Л. Баженовым с соавторами [Bazhenov et al., 2016] приводятся соображения, что в данном разрезе скорость осадконакопления достаточно обычная для данного типа пород и составляет около 100 м на миллион лет. Кроме того, С.В. Рудько, Д.В. Рудько, И.В. Головановой и Р.Ю. Сальмановой были проведены предварительные циклостратиграфические исследования разреза с использованием данных по магнитной восприимчивости пород. Полученная ими предварительная оценка в 1.6 млн лет на 80 м разреза неплохо согласуется с оценкой М.Л. Баженова.

Достаточно частые инверсии в коротком стратиграфическом интервале встречаются и в породах другого возраста. Например, в северо-западной части Сибири в терригенных отложениях среднего кембрия было обнаружено 28 магнитозон на 850 м [Pavlov, Gallet, 2001], что составляет 6–8 инверсий на миллион лет, это примерно в три раза меньше, чем в зиганской свите, а также 25 магнитозон на 1100 м в красноцветных молассах Пакистана [Johnson et al., 1985], что составляет около 3 инверсий на миллион лет.

Такая частая смена полярности как в нижней части зиганской свиты встречается еще всего лишь в двух местах на Земле в верхнеэдиакарских отложениях. В районе Белого моря (в скважине Верхотина), где частота инверсий составляет 55 магнитозон на 400 м [Роров et al., 2005], и в юго-восточной Сибири в лопатинской свите, где обнаружено 15 магнитозон в красноцветных отложениях мощностью 45 м [Шацилло и др., 2015]. Количество магнитозон в этих трех разрезах значительно больше, а их средняя мощность гораздо меньше, чем в любом другом разрезе осадочных пород любого возраста, хотя расстояние между ними превышает 2500 км.

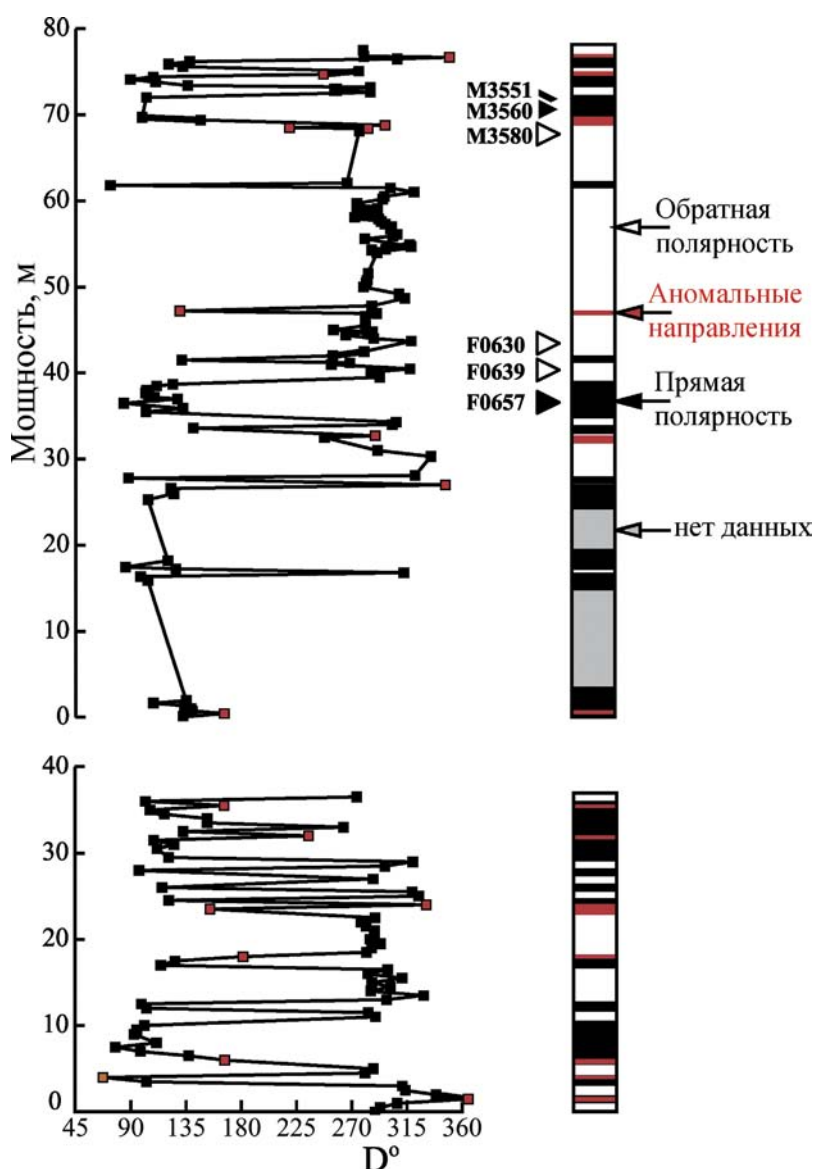


Рис. 4. Графики распределения магнитного склонения (D°) по разрезам (метры) зиганской свиты и соответствующие магнитостратиграфические колонки

Графики и колонки расположены вертикально; мощности указаны отдельно для каждого разреза. Прямая, обратная и аномальная полярности показаны черными, белыми и красными интервалами соответственно. Треугольники на левой стороне указывают на сайты тонкослоистых пород (из [Bazhenov et al., 2016]).

Fig. 4. Plots of declination (D°) versus thickness (meters) for 2 sections of Zigan formation and the corresponding polarity logs

Plots and logs are vertically spaced; thicknesses are given separately for each section. Normal, reversed, and anomalous data are shown by black, white and red intervals, respectively. Triangles on the left side indicate the thin-bed sites (according to [Bazhenov et al., 2016]).

Заключение

Таким образом, два разреза красноцветных песчаников зиганской свиты, находящиеся на территории Ишимбайского района РБ, являются интересным объектом для изучения. Проводившиеся неоднократно палеомагнитные исследования зиган-

ских пород подтвердили уникальность этих геологических объектов. Работа, начавшаяся с изучения палеопозиции континента, принесла много загадок и пищи для размышления. И если ответ на вопрос о палеопозиции кратона и первичности намагниченности на данном этапе исследований можно считать найденным, то на вопрос о причине частых

инверсий и их последствиях еще предстоит ответить. По крайней мере, среди широкого спектра внешних причин, которые могли обусловить появление и вымирание эдиакарской фауны, а затем «кембрийский взрыв» биоразнообразия, гипотеза о связи наиболее крупной из биосферных перестроек в истории Земли с эпизодом аномального состояния геомагнитного поля является самой молодой и малоисследованной.

К сожалению, основной разрез красноцветов зиганской свиты, находящийся в дорожной выемке автодороги Стерлитамак–Белорецк, постепенно разрушается, оплывает и задерновывается. Качество образцов, отобранных в 2018 г., заметно хуже, чем при отборе 2011 г. По-видимому, необходимо или каким-то образом укреплять и расчищать разрез, или форсировать оставшиеся работы.

Палеомагнитная часть работы выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-05-00631, материалы по геологии западной части Южного Урала собраны и обобщены в рамках темы государственного задания № 0246-2019-0087.

Список литературы:

Голованова И.В., Данукалов К.Н., Кадыров А.Ф., Хидиятов М.М., Сальманова Р.Ю., Шакуров Р.К., Левашова Н.М., Баженов М.Л. Палеомагнетизм осадочных толщ и происхождение структур западного склона Южного Урала // *Физика Земли*. – 2017. – № 2. – С. 148–156. – doi: 10.7868/S0002333717010057.

Гражданкин Д.В., Марусин В.В., Меерт Дж., Крупнин М.Т., Маслов А.В. Котлинский горизонт на Южном Урале // *Докл. РАН*. – 2011. – Т. 440, № 2. – С. 201–206.

Пучков В.Н. Уралиды и тиманиды, их структурные связи и место в геологической истории Урало-Монгольского складчатого пояса // *Геология и Геофизика*. – 2003. – Т. 44, № 1–2. – С. 28–39.

Стратотип рифея. Стратиграфия. Геохронология. – М.: Наука, 1983. – 183 с. – (Тр. ГИН АН СССР; Вып. 377).

Шаццло А.В., Кузнецов Н.Б., Павлов В.Э., Федонкин М.А., Прияткина Н.С., Серов С.Г., Рудько С.В. Первые магнитостратиграфические данные о стратотипе лопатинской свиты (северо-восток Енисейского кряжа): проблемы ее возраста и палеогеографии Сибирской платформы на рубеже протерозоя и фанерозоя // *Докл. РАН*. – 2015. – Т. 465, № 4. – С. 464–468. – doi: 10.7868/S0869565215340228.

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 and Planetary Science Letters*. – 2016. – Vol. 435. – P. 124–135. – doi: 10.1016/j.epsl.2015.12.015.

Cogné J.P. PaleoMac: a Macintosh application for treating paleomagnetic data and making plate reconstructions // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2003. – Vol. 4, No. 1. – article No. 1007. – doi: 10.1029/2001GC000227.

Enkin R.I. A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. – Pacific Geoscience Centre. Geological Survey of Canada, 1994. – 16 p.

Johnson N.M., Stix J., Tauze L., Cerveny P.F., Tahirkheli R. Paleomagnetic chronology, fluvial processes, and tectonic implications of the Siwalik deposits near Chinji village, Pakistan // *The Journal of Geology*. – 1985. – Vol. 93, Is. 1. – P. 27–40. – doi: 10.1086/628917.

Kirschvink J.L. The least-square line and plane and the analysis of palaeomagnetic data // *Geophysical Journal International*. – 1980. – Vol. 62, Is. 3. – P. 699–718. – doi: 10.1111/j.1365-246x.1980.tb02601.x.

Kuznetsov N.B., Natapov L.M., Belousova E.A., O'Reilly S.Y., Griffin W.L. Geochronological, geochemical and isotopic study of detrital zircon suites from late Neoproterozoic clastic strata along the NE margin of the East European Craton: Implications for plate tectonic models // *Gondwana Res.* – 2010. – Vol. 17, Is. 2–3. – P. 583–601. – doi: 10.1016/j.gr.2009.08.005.

Levashova N.M., Bazhenov M.L., Meert J.G., Danukalov K.N., Golovanova I.V., Kuznetsov N.B., Fedorova N.M. Paleomagnetism of upper Ediacaran clastics from the South Urals: Implications to paleogeography of Baltica and the opening of the Iapetus Ocean // *Gondwana Research*. – 2015. – Vol. 28, Is. 1. – P. 191–208. – doi: 10.1016/j.gr.2014.04.012.

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 Research*. – 2013. – Vol. 236. – P. 16–30. – doi: 10.1016/j.precamres.2013.06.006.

Maslov A.V. Riphean and Vendian sedimentary sequences of the Timanides and Uralides, the eastern periphery of the East European Craton // *Geol. Soc., London, Memoirs*. – 2004. – Vol. 30, Is. 1. – P. 19–35. – doi: 10.1144/gsl.mem.2004.030.01.03.

McFadden P.L., McElhinny M.W. Classification of the reversal test in paleomagnetism // *Geophys. J. Intern.* – 1990. – Vol. 103. – P. 725–729.

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 Research*. – 2016. – Vol. 34. – P. 149–157. – doi: 10.1016/j.gr.2016.01.001.

Pavlov V.E., Gallet Y. Middle Cambrian high magnetic reversal frequency (Kulumbe River section, northwestern Siberia) and reversal behavior during the Early Palaeozoic // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2001. – Vol. 185, Is. 1–2. – P. 173–183. – doi: 10.1016/S0012-821X(00)00364-2.

Popov V.V., Khramov A.N., Bachtadse 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 // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2005. – Vol. 7, Is. 2. – P. 115–143. – doi: 10.2205/2005es000167.

Torsvik T.H., Van der Voo R., Preeden U., MacNiocaill C., Steinberger B., Doubrovine P.V., van Hinsbergen D.J.J., Domeir M., Gaina C., Tohver E., Meert J.G., McCausland P.J.A., Cocks R.M. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics // *Earth Science Reviews*. – 2012. – Vol. 114, Is. 3–4. – P. 325–368. – doi: 10.1016/j.earscirev.2012.06.007.

References:

- 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 and Planetary Science Letters*. 2016. Vol. 435. P. 124–135. doi: 10.1016/j.epsl.2015.12.015.
- Cogné J.P.* PaleoMac: a Macintosh application for treating paleomagnetic data and making plate reconstructions // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2003. Vol. 4, No. 1. article No. 1007. doi: 10.1029/2001GC000227.
- Enkin R.I.* A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Pacific Geoscience Centre. Geological Survey of Canada, 1994. 16 p.
- Golovanova I.V., Danukalov K.N., Kadyrov A.F., Khidiyatov M.M., Sal'manova R.Y., Shakurov R.K., Levashova N.M., Bazhenov M.L.* Paleomagnetism of sedimentary strata and the origin of the structures in the western slope of South Urals // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2017. Vol. 53, No. 2. P. 311–319. doi: 10.1134/S1069351317010050.
- Grazhdankin D.V., Marusin V.V., Meert J., Krupenin M.T., Maslov A.V.* Kotlin regional stage in the South Urals // *Doklady Earth Sciences*. 2011. Vol. 440, No. 1. P. 1222–1226. doi: 10.1134/S1028334X11090170.
- Johnson N.M., Stix J., Tauxe L., Cerveny P.F., Tahirkheli R.* Paleomagnetic chronology, fluvial processes, and tectonic implications of the Siwalik deposits near Chinji village, Pakistan // *The Journal of Geology*. 1985. Vol. 93, Is. 1. P. 27–40. doi: 10.1086/628917.
- Kirschvink J.L.* The least-square line and plane and the analysis of palaeomagnetic data // *Geophysical Journal International*. 1980. Vol. 62, Is. 3. P. 699–718. doi: 10.1111/j.1365-246x.1980.tb02601.x.
- Kuznetsov N.B., Natapov L.M., Belousova E.A., O'Reilly S.Y., Griffin W.L.* Geochronological, geochemical and isotopic study of detrital zircon suites from late Neoproterozoic clastic strata along the NE margin of the East European Craton: Implications for plate tectonic models // *Gondwana Research*. 2010. Vol. 17, Is. 2–3. P. 583–601. doi: 10.1016/j.gr.2009.08.005.
- Levashova N.M., Bazhenov M.L., Meert J.G., Danukalov K.N., Golovanova I.V., Kuznetsov N.B., Fedorova N.M.* Paleomagnetism of upper Ediacaran clastics from the South Urals: Implications to paleogeography of Baltica and the opening of the Iapetus Ocean // *Gondwana Research*. 2015. Vol. 28, Is. 1. P. 191–208. doi: 10.1016/j.gr.2014.04.012.
- 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 Research*. 2013. Vol. 236. P. 16–30. doi: 10.1016/j.precamres.2013.06.006.
- Maslov A.V.* Riphean and Vendian sedimentary sequences of the Timanides and Uralides, the eastern periphery of the East European Craton // *Geol. Society, London, Memoirs*. 2004. Vol. 30, Is. 1. P. 19–35. doi: 10.1144/gsl.mem.2004.030.01.03.
- McFadden P.L., McElhinny M.W.* Classification of the reversal test in paleomagnetism // *Geophys. J. Intern.* 1990. Vol. 103. P. 725–729.
- 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 Research*. 2016. Vol. 34. P. 149–157. doi: 10.1016/j.gr.2016.01.001.
- Pavlov V.E., Gallet Y.* Middle Cambrian high magnetic reversal frequency (Kulumbé River section, northwestern Siberia) and reversal behavior during the Early Palaeozoic // *Earth and Planetary Science Letters*. 2001. Vol. 185, Is. 1–2. P. 173–183. doi: 10.1016/S0012-821X(00)00364-2.
- Popov V.V., Khramov A.N., Bachtadse V.* Palaeomagnetism, magnetic stratigraphy, and petromagnetism of the Upper Vendian sedimentary rocks in the sections of the Zolotitsa River and in the Verkhotina Hole, Winter Coast of the White Sea, Russia // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2005. Vol. 7, Is. 2. P. 115–143. doi: 10.2205/2005es000167.
- Puchkov V.N.* Uralidy i timanidy, ikh strukturnye svyazi i mesto v geologicheskoi istorii Uralo-Mongol'skogo skladchatogo poyasa [The Uralides and Timanides: Their structural relationship and position in the geologic history of the Ural-Mongolian fold belt] // *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*. 2003. Vol. 44, No. 1–2. P. 28–39. (In Russian).
- Shatsillo A.V., Kuznetsov N.B., Pavlov V.E., Fedonkin M.A., Priyatkina N.S., Serov S.G., Rudko S.V.* The first magnetostratigraphic data on the stratotype of the Lopata Formation, Northeastern Yenisei Ridge: Problems of its age and paleogeography of the Siberian Platform at the Proterozoic–Phanerozoic boundary // *Doklady Earth Sciences*. 2015. V. 465, No. 2. P. 1211–1214. doi: 10.1134/S1028334X15120065.
- Stratotip rifeya. Stratigrafiya. Geokhronologiya [Stratotype of the Riphean. Stratigraphy. Geochronology]. Moscow: Nauka, 1983. 183 p. (Trudy GIN AN USSR; Is. 377). (In Russian).
- Torsvik T.H., Van der Voo R., Preeden U., MacNiocail C., Steinberger B., Doubrovine P.V., van Hinsbergen D.J.J., Domeier M., Gaina C., Tohver E., Meert J.G., McCausland P.J.A., Cocks R.M.* Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics // *Earth Science Reviews*. 2012. Vol. 114, Is. 3–4. P. 325–368. doi: 10.1016/j.earscirev.2012.06.007.

Сведения об авторах:

Данукалов Константин Николаевич, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, ИГ УФИЦ РАН, E-mail: danukalov@mail.ru

Парфирьев Никита Петрович, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, ИГ УФИЦ РАН, E-mail: Parfirjev.nikita@yandex.ru

Голованова Инесса Владимировна, доктор физ.-мат. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, ИГ УФИЦ РАН, E-mail: golovanova@ufaras.ru

Сергеева Нина Дмитриевна, кандидат геол.-мин. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, ИГ УФИЦ РАН, E-mail: riphey@ufaras.ru

Сальманова Раушания Юрисовна, кандидат физ.-мат. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, ИГ УФИЦ РАН, E-mail: vrushana@mail.ru

About the authors:

Danukalov Konstantin Nikolaevich, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, IG UFRC RAS, E-mail: danukalov@mail.ru

Parfir'ev Nikita Petrovich, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, IG UFRC RAS, E-mail: Parfirjev.nikita@yandex.ru

Golovanova Inessa Vladimirovna, doctor of physical and mathematical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, IG UFRC RAS, E-mail: golovanova@ufaras.ru

Sergeeva Nina Dmitrievna, candidate of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, IG UFRC RAS, Ufa, E-mail: riphey@ufaras.ru

Sal'manova Raushaniya Yurisovna, candidate of physical and mathematical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, IG UFRC RAS, E-mail: vrushana@mail.ru