

ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ

УДК 550.384.5

ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКАЯ ПЛАТФОРМА В КОНЦЕ ЭДИАКАРИЯ:  
НОВЫЕ ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ И ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Н.М. Федорова, Н.М. Левашова, М.Л. Баженов, Дж.Дж. Меерт\*, Н.Д. Сергеева\*\*,  
И.В. Голованова\*\*, К.Н. Данукалов\*\*, Н.Б. Кузнецов, А.Ф. Кадыров\*\*, М.М. Хидиятов\*\*

*Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия*

*\* Department of Geological Sciences University of Florida, 241 Williamson Hall, Gainesville, FL 32611, USA*

*\*\* Институт геологии, УНЦ РАН, 450000, Уфа, ул. К. Маркса, 16/2, Россия*

О палеогеографии Земли в интервале времени 700—500 млн лет мало что известно достоверно, в том числе о положении Восточно-Европейской платформы. Количество и качество палеомагнитных определений для позднего докембрия—кембрия этой платформы совершенно недостаточно для уверенных палеогеографических и палеотектонических построений. Поскольку почти все пригодные для палеомагнитных исследований объекты на самой платформе уже изучены, наиболее перспективным сейчас представляется изучение деформированных окраин платформы. Особый интерес представляет Башкирский мегантиклинорий на Южном Урале, где известны многочисленные осадочные разрезы эдиакарского возраста, в некоторых из них найдены прослойки туфов, пригодных для датирования изотопно-геохронологическими методами. В данной работе представлены результаты палеомагнитных и геохронологических исследований верхнеэдиакарской зиганской свиты, опробованной в западной части западного крыла Башкирского мегантиклинория. В соответствии с полученными данными, около 550 млн лет назад Восточно-Европейская платформа должна была находиться в приэкваториальных широтах.

*Палеомагнетизм, эдиакарий, палеогеография, Восточно-Европейская платформа, Южный Урал.*

THE EAST EUROPEAN PLATFORM IN THE LATE EDIACARAN:  
NEW PALEOMAGNETIC AND GEOCHRONOLOGICAL DATA

N.M. Fedorova, N.M. Levashova, M.L. Bazhenov, J.G. Meert, N.D. Sergeeva, I.V. Golovanova,  
K.N. Danukalov, N.B. Kuznetsov, A.F. Kadyrov, and M.M. Khidiyatov

The paleogeography of the Earth, including the East European Platform, is very inaccurately defined for the interval 500–700 Ma. The quantity and quality of Late Precambrian–Cambrian paleomagnetic data on this platform are absolutely insufficient for reliable paleogeographical or paleotectonic reconstructions. Since there are almost no unstudied objects in the platform that could be used for paleomagnetic studies, it seems reasonable to consider the deformed platform margins. Of particular interest is the Bashkir anticlinorium (South Urals) with numerous Ediacaran sedimentary sections, some of which contain tuff beds suitable for isotope dating. We present paleomagnetic and geochronological data on the Upper Ediacaran Zigan Formation, sampled in the western part of the western limb of the Bashkir anticlinorium. The East European Platform must have been at near-equatorial latitudes at ~550 Ma.

*Paleomagnetism, Ediacaran, paleogeography, East European Platform, South Urals*

ВВЕДЕНИЕ

Интервал с эдиакария до раннего ордовика кажется одним из наиболее загадочных и интересных в истории Земли [Соколов, 2011]. Начало эдиакария совпало с концом эпохи глобальных оледенений [Hoffman et al., 1998; Evans, 2000], а после этой эпохи произошло резкое увеличение разнообразия форм жизни. Обычно это событие называют кембрийским взрывом. К этому же интервалу времени относится насыщение атмосферы и океанов кислородом и резкий рост уровня биотурбации [Crimes, 1992; Knoll,

2001; McCall, 2006]. В кембрии происходит завершение формирования суперконтинента Гондвана [Meert, Tamrat, 2004; Li et al., 2008]. Дж. Меерт и др. [Meert et al., 1993] предполагали, что скорость движения континентов в эдиакарии—кембрии была существенно выше, чем позднее. Д. Эванс [Evans, 1998] для этого же времени выдвигает гипотезу о необычайно высоких скоростях истинного перемещения полюса, а Дж. Киршвинк и др. [Kirschvink et al., 1997] считают, что истинное перемещение полюса в это время имело возвратно-поступательный характер. Трудно найти другой временной интервал, к которому научное сообщество проявляло бы столь активный интерес, и в отношении которого выдвигалось бы такое количество противоречивых, иногда весьма экзотических гипотез.

Расположение и движение основных континентальных масс, возникновение и закрытие океанов являются теми факторами, которые во многом контролируют эти явления. Однако существующие представления о палеогеографии Земли и тектонике плит в докембрии, после распада Родинии и до возникновения Гондваны (от 800—750 до 550—530 млн лет), неопределенны и противоречивы.

Основным инструментом для создания палеогеографических и палеотектонических построений был и остается палеомагнетизм. К сожалению, именно для интересующего нас интервала времени количество и качество палеомагнитных определений явно недостаточно для однозначных палеогеографических и палеотектонических построений [Метелкин и др., 2012]. Для Северной Америки (Лаврентии) и для Восточно-Европейской платформы эта проблема стоит особенно остро. По данным разных авторов, Лаврентия и Восточно-Европейская платформа (ВЕП) в эдиакарии могли находиться в любых широтах — от Южного полюса до экватора [Kirschvink et al., 1997; Evans, 1998; Meert, 1999; McCausland et al., 2007; Meert et al., 2007; Pisarevsky et al., 2008; Abrajevitch, Van der Voo, 2010; Schmidt, Williams, 2010; Meert, 2013].

Существующие на сегодняшний день палеомагнитные данные по эдиакарско-кембрийским породам ВЕП не позволяют сколько-нибудь однозначно определить ее палеогеографическое положение. Понятно, что для воссоздания палеогеографии ВЕП нужно получать новые данные. К сожалению, на самой платформе почти все пригодные для палеомагнитных исследований объекты уже изучены. Наиболее перспективным представляется изучение деформированных окраин платформы. К их числу в первую очередь следует отнести отложения Башкирского поднятия, где известны мощные, преимущественно осадочные разрезы позднего эдиакария, пригодные для палеомагнитных исследований. В некоторых из них присутствуют прослои туфов, что позволяет датировать разрезы изотопно-геохронологическими методами.

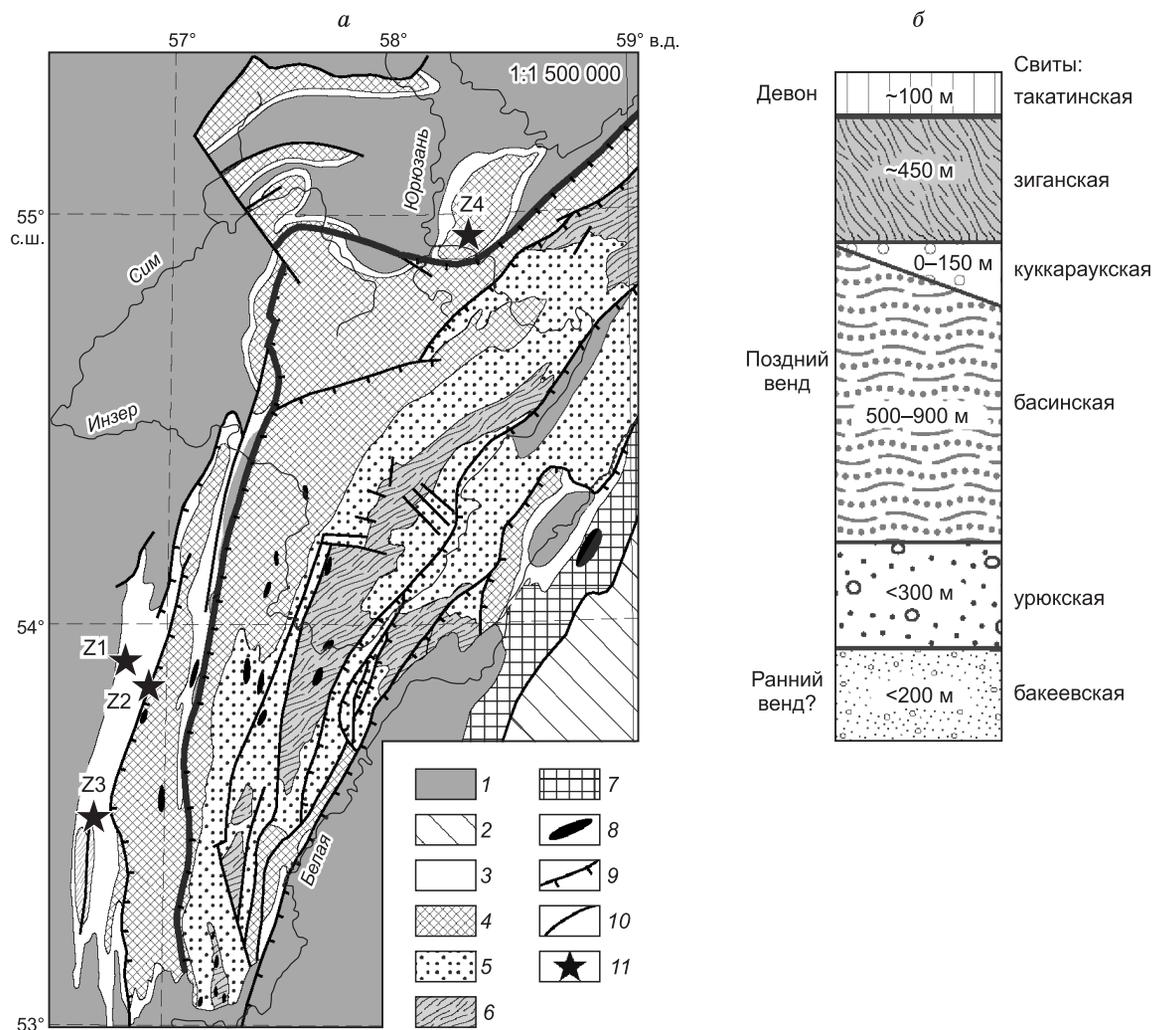
В нашей статье представлены новые палеомагнитные и геохронологические данные, полученные по осадочным породам конца эдиакария, что позволяет более уверенно судить о положении ВЕП около 550 млн лет назад.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И ОПРОБОВАНИЕ

Мощные верхнепротерозойские отложения Башкирского мегантиклинория (рис. 1) являются одним из наиболее полных разрезов мезо- и неопротерозоя в мире. Здесь выделены стратотипы многих подразделений региональной стратиграфической шкалы для интервала 1500—500 млн лет [Стратотип..., 1983]. Самым верхним подразделением неопротерозойской толщи на западе мегантиклинория является сложенная терригенными осадками ашинская серия, которая с размывом залегает на подстилающих мезопротерозойских отложениях. В западной части мегантиклинория отложения ашинской серии со стратиграфическим несогласием перекрыты осадками такатинской свиты нижнего девона, а на юге — отложениями среднего ордовика.

Ашинская серия разделена на пять свит [Стратотип..., 1983; Беккер, 1988]. Нижние две (бакеевская и урюкская) имеют кварцево-аркозовый состав, а три верхние (басинская, куккараукская и зиганская) — полимиктовый (см. рис. 1, б). В целом серия рассматривается как моласса [Беккер, 1988], но специфическая черта моласс — полимиктовость — выражена только в ее верхней части.

По составу породы басинской и зиганской свит практически неотличимы друг от друга. Среди отложений обеих свит преобладают серо-бурые и серо-зеленые песчаники и алевролиты, с подчиненным количеством аргиллитов и гравелитов, и в полевых условиях отличить породы зиганской свиты от пород басинской можно только в тех разрезах, где есть выходы конгломератов куккараукской свиты. Разрез куккараукской свиты сложен преимущественно грубозернистыми красноцветными песчаниками со слоем полимиктовых красно-бурых конгломератов в ее средней части [Геологическая карта..., 2002]. Эти конгломераты — региональный маркирующий горизонт, отделяющий басинскую свиту от зиганской. Мощность конгломератов составляет первые десятки метров на юге и первые метры в центральной части района, на севере они отсутствуют. Возраст ашинской серии до сих пор остается спорным, но преобладает мнение, что верхние четыре свиты относятся к эдиакарию, а нижняя бакеевская свита — к концу криогения.



**Рис. 1. а** — схематическая карта Юго-Западного Урала ([Геологическая карта..., 2002] с упрощением). **б** — упрощенная стратиграфическая колонка разрезов эдиакарских отложений на западе Южного Урала.

1 — палеозой Восточно-Европейской платформы и Западного Урала; 2 — палеозой Восточного Урала; 3 — эдиакарий; 4 — неопротерозой; 5 — верхняя часть мезопротерозоя; 6 — нижняя часть мезопротерозоя; 7 — метаморфические комплексы; 8 — интрузии; 9 — надвиги; 10 — прочие разломы; 11 — изученные разрезы эдиакария, обозначенные как в тексте. Толстая линия обозначает Зильмердакский надвиг, к западу от которого нет углового несогласия между эдиакарскими и палеозойскими породами.

Основным объектом настоящего исследования стали отложения зиганской свиты, которая завершает разрез ашинской серии. В составе свиты преобладают средне- и тонкозернистые, зеленовато-серые и буровато-серые полимиктовые песчаники, переслаивающиеся с полимиктовыми и реже кварцевыми алевролитами, с прослоями и пачками аргиллитов. Суммарная мощность отложений составляет до 500 м [Беккер, 1988].

Палеомагнитное и геохронологическое опробование пород зиганской свиты было проведено в нескольких разрезах в западной части Башкирского мегантиклинория (см. рис. 1, а):

**Z1** — 53.97°N, 56.89°E. Вдоль дороги Мендым—Толпарово опробовано одно обнажение зиганской свиты мощностью около 30 м и шесть изолированных выходов выше по разрезу, мощность каждого из которых составляет 4—6 м. Породы представлены в основном чередованием бурых, серо-бурых и серо-зеленых песчаников, относящихся к нижней части зиганской свиты. Всего здесь отобрано 66 ориентированных образцов.

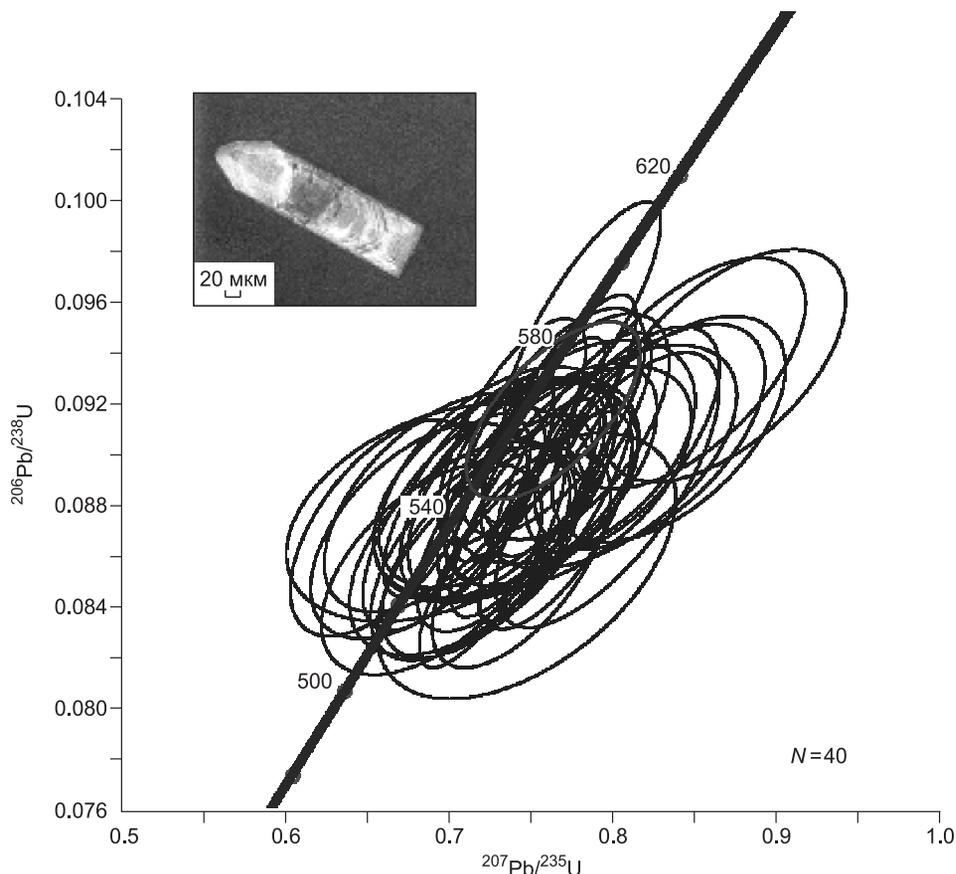
**Z2** — 53.91°N, 56.82°E. В бортах долины р. Мендым опробовано шесть изолированных выходов пород зиганской свиты мощностью от 2 до 4 м каждый. Во всех обнажениях выходят только серо-зеленые песчаники. Всего отобрано 42 ориентированных образца.

**Z3** — 53.56°N, 56.66°E. В береговых обрывах р. Зиган опробованы бурые и серо-бурые песчаники нижней части зиганской свиты на интервале 50—60 м. Также изучено несколько изолированных выходов серо-зеленых песчаников средней и верхней частей свиты. Всего отобрано 125 ориентированных образцов.

**Z4** — 54.56°N, 58.10°E. На западной окраине пос. Усть-Катав находится обнажение бурых, серо-бурых, серых и зеленых песчаников и алевролитов верхней части ашинской серии. Мощность разреза здесь 70—75 м. Породы куккараукской свиты в этом обнажении отсутствуют, поэтому определить, относится этот разрез к зиганской или к басинской свите, невозможно. В нижней трети разреза, среди серо-бурых песчаников и алевролитов, присутствуют несколько нелитифицированных туфовых прослоев мощностью от 1 до 10 см [Гражданкин и др., 2011]. В одном из этих прослоев была отобрана проба для датирования пород уран-свинцовым методом по цирконам. Палеомагнитное опробование в этом разрезе не проводилось.

### ВОЗРАСТ ЗИГАНСКОЙ СВИТЫ

По туфам, отобранным в разрезе Z4, было проведено датирование пород уран-свинцовым методом по цирконам. Путем размачивания из почти нелитифицированного образца туфа была приготовлена пульпа, из которой были выделены цирконы с помощью тяжелых жидкостей и электромагнитной сепарации. Зерна циркона были отделены вручную под бинокулярным микроскопом, а затем зафиксированы в эпоксидной матрице вместе с зернами циркона из стандарта FC-1. Изотопные U-Pb данные были получены в Университете Флориды с использованием метода LA-MC-ICP-MS (лазерная абляция с измерением на многоколлекторном ИСП масс-спектрометре). Оборудование для метода LA-MC-ICP-MS анализа и методика исследования описаны в [Kosler et al., 2003; Simonetti et al., 2005]. Погрешности оценивались по воспроизводимости изотопного анализа стандартного циркона FC-1 [Paces et al., 1993],



**Рис. 2.** Диаграмма с конкордией для образца из туфового прослоя разреза Z4.

На врезке показана катодолюминесцентная фотография одного из изученных зерен циркона.

которая приписывалась индивидуальным результатам. Значения отношений  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  были скорректированы на обыкновенный Pb с использованием «метода 207» [Williams et al., 1998]. Исправленные на обыкновенный Pb значения  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  рассчитывались по известному отношению  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U} = 137.88$ , исправленному отношению  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  и нормализованному  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  отношению. Общепринятая диаграмма с конкордией была построена с помощью программы Isoplot/Ex v. 3.09a [Ludwig, 2004].

Всего удалось изучить 51 зерно циркона (80—100 мкм). Для 40 зерен степень дискордантности для изотопных отношений  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  и  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  менее 10 %, что позволило определить конкордантное значение U-Pb возраста изученных туфов как  $548.2 \pm 3.5$  млн лет (рис. 2). Отметим, что это определение уже упоминалось Д.В. Гражданкиным и др. [2011], но без описания самого результата.

Как уже было отмечено, в разрезе Z4 невозможно сказать, относятся ли опробованные туфовые прослои к басинской или к зиганской свите, однако полученная по туфам изотопная датировка служит ключом к решению этого вопроса. Басинская свита фаунистически охарактеризована: в ней была найдена эдиакарская фауна: *Pseudorhizostomites howchini Sprigg*; *Protodipleurosoma paulus Beck.*; *Paliella paltelliformis Fed.*; *Medusinites sp.*, а также следы ползания: *Palaeopascichnus delicatus Palij*; *Neonereites uniserialis Seilacher*, *Catellichnus oktonarius Becker* [Беккер, 1992, 1996]. Данный комплекс позволяет ограничить возраст басинской свиты интервалом 575—560 млн лет. Поскольку U-Pb возраст изученных туфов составляет  $548.2 \pm 3.5$  млн лет, можно достаточно уверенно утверждать, что разрез Z4 сформировался позже басинской свиты. Басинскую свиту и девонские песчаники такатинской свиты разделяют только кластиты зиганской свиты и грубозернистые песчаники и конгломераты куккараукской свиты. Поскольку породы разреза Z4 резко отличаются от куккараукской свиты, остается только одна возможность — разрез сложен породами зиганской свиты, и полученную здесь изотопную датировку можно распространить на всю свиту и считать, что ее возраст около 548 млн лет.

### ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

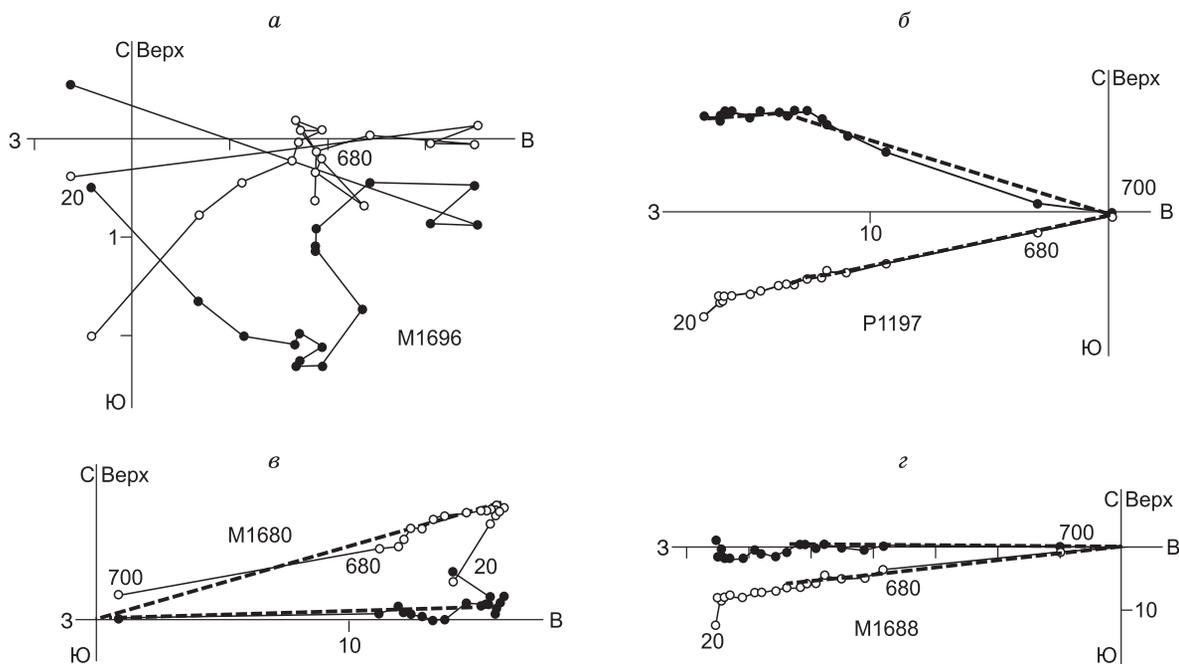
Для палеомагнитных исследований вручную отбирались штуфы, ориентированные горным компасом. Отбор образцов велся в стратиграфическом порядке, каждые 6—8 образцов рассматривались как сайт. Интервал опробования для одного сайта составлял обычно от 3—4 до 6—7 м. Из образцов выпиливались кубики с ребром 20 мм. В палеомагнитной лаборатории ГИН РАН в Москве все образцы были подвергнуты ступенчатому (до 20 шагов) температурному размагничиванию вплоть до 700 °С. Размагничивание проводилось в самодельной печи с двухслойным пермаллоевым экраном с остаточным полем около 10 нТл. Намагниченность измерялась на спин-магнитометре JR-4 с уровнем шума 0.05 мА/м, помещенном в кольца Гельмгольца, что уменьшило влияние магнитного поля Земли в несколько раз.

Результаты прогревов анализировались с помощью ортогональных диаграмм [Zijderveld, 1967]. Для определения направлений компонент намагниченности использовались линейные участки траекторий, включающие не менее трех измерений [Kirschvink, 1980]. Данные по образцам из одного сайта

Направления высокотемпературной компоненты намагниченности в осадочных породах зиганской свиты

Сайт	АП°	П°	N/N <sub>0</sub>	ССК				ДСК			
				D°	I°	k	α <sub>95</sub> °	D°	I°	k	α <sub>95</sub> °
<b>Разрез Z1</b>											
P1147	303	21	16/7	281.1	40.7	18.7	14.3	285.4	20.8	17.6	14.8
P1163	290	24	16/10	101.8	-42.7	21.1	10.8	103.6	-19.3	18.1	11.7
<b>Разрез Z3</b>											
N5061	297	26	15/6	279.3	43.3	26.5	13.3	283.5	18.0	26.5	13.3
M1674	291	23	7/6	91.7	-44.0	56.5	9.0	96.2	-22.0	39.1	10.8
P1187	279	26	8/6	285.7	48.6	90.7	7.1	283.9	22.6	80.8	7.5
M1681	286	28	14/11	289.1	46.1	20.6	10.3	288.3	18.0	22.5	9.8
N5069	282	26	15/10	304.5	36.3	15.1	13.1	300.4	12.2	13.6	13.8
M1695	283	26	15/13	120.2	-43.7	14.2	11.4	116.0	-18.5	12.7	12.1
Среднее по сайтам	—	—	(8)	286.9	43.7	83.4	6.1	287.2	19.1	103	5.5
Среднее по образцам	—	—	106/69	293.0	38.4	10.4	5.6	291.7	13.8	10.4	5.6

Примечание. ССК — современная система координат; ДСК — древняя система координат; АП — азимут падения; П — угол падения; N/N<sub>0</sub> — число отобранных / к числу использованных образцов (в скобках — число сайтов); D — склонение; I — наклонение; k — кучность; α<sub>95</sub> — радиус круга доверия [Fisher, 1953].



**Рис. 3. Примеры диаграмм Зийдervельда для образцов зиганской свиты в древней системе координат.**

Залитые (незалитые) символы — проекция на горизонтальную (вертикальную) плоскость. Температуры даны в градусах Цельсия, интенсивность намагниченности по осям — в мА/м. В обр. М1696 (а) компоненты намагниченности выделить нельзя. Сплошная линия обозначает среднетемпературную компоненту (см. рис. 4, б), штриховая — высокотемпературную компоненту (ВТК). а—г — пояснения см. в тексте.

осреднялись, и полученные таким образом средние векторы по сайтам использовались для вычисления общего среднего направления для всей толщи. При обработке данных использовалось программное обеспечение Ж.-П. Конье [Cogné, 2003].

В большинстве изученных образцов зиганской свиты выделяется низкотемпературная компонента намагниченности, которая удаляется при температурах до 200°. Эта компонента по направлению близка к направлению современного поля, и в дальнейшем рассматриваться не будет. При нагревах выше 200° в зеленых и серо-зеленых песчаниках, которые составляют около 60 % отобранной коллекции, не удается выделить стабильных компонент намагниченности (рис. 3, а).

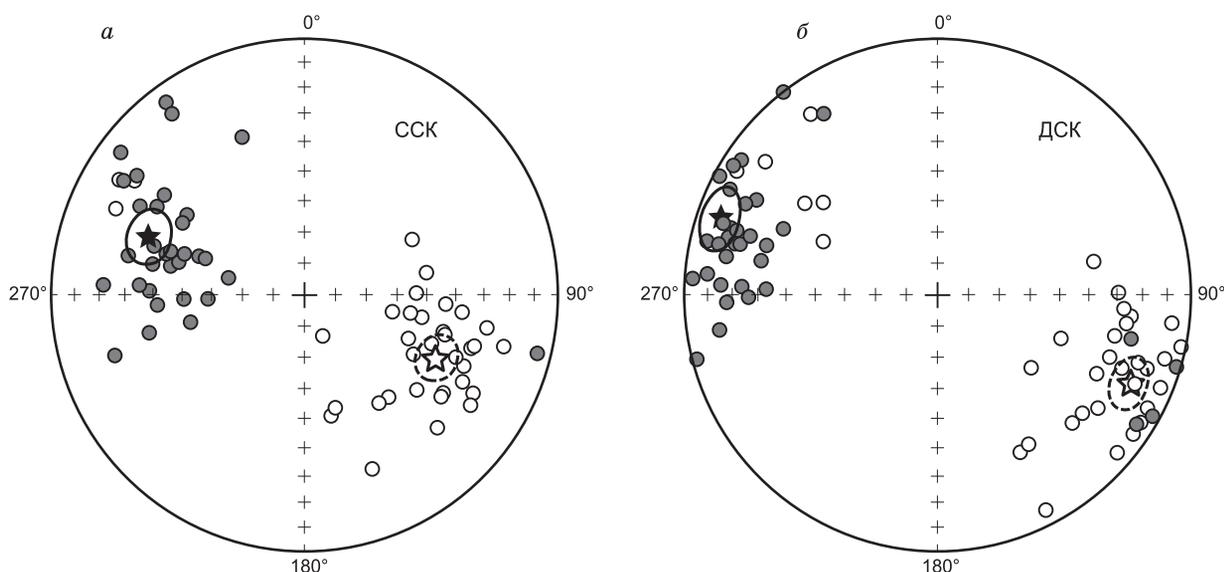
В серо-бурых и бурых породах при анализе некоторых образцов в температурном интервале от 300 до 575° выделяется среднетемпературная компонента намагниченности (см. рис. 3, б), однако ее направления не сгруппированы как в пределах сайтов, так и на уровне всей коллекции. Мы полагаем, что эта компонента представляет собой результат перекрытия спектров блокирующих температур низко- и высокотемпературных компонент намагниченности. Соответственно, эти направления не несут полезной палеомагнитной информации, и в дальнейшем рассматриваться также не будут.

Примерно в двух третях образцов серо-бурых и бурых песчаников зиганской свиты удалось выделить высокотемпературную компоненту (ВТК), спадающую к началу координат (см. рис. 3, в, г) и имеющую блокирующие температуры до 670—675 °С, но в некоторых образцах не превышают 580 °С. Вероятно, в изученных породах основным носителем намагниченности является гематит, а магнетит — значительно реже. Направления ВТК хорошо сгруппированы как внутри сайтов, так и для всей коллекции (таблица). Тест складки [McElhinny, 1964] для ВТК неинформативен, поскольку вариации залеганий слишком малы.

В пользу первичности выделенной ВТК можно привести ряд аргументов. Во-первых, в коллекции установлены направления как прямой, так и обратной полярности. Угол между средними векторами разной полярности  $\gamma = 8.7^\circ$  меньше критического значения  $\gamma_{crit} = 10.5^\circ$  [McFadden, McElhinny, 1990], так что тест обращения (рис. 4) положительный.

Во-вторых, в обнажениях выделяются несколько зон разной полярности; например, в разрезе Z3 по р. Зиган было выделено около двадцати зон, что свидетельствует в пользу первичности ВТК.

В-третьих, если бы изученные породы конца эдиакария были перемагничены позднее, полученный полюс совпал бы с соответствующим участком фанерозойской кривой кажущейся миграции полю-



**Рис. 4. Стереогаммы направлений высокотемпературной компоненты намагниченности для образцов осадочных пород зиганской свиты.**

ССК — современная система координат (а). ДСК — древняя система координат (б). Кружками показаны направления прямой. Звездочками показаны средние направления высокотемпературной компоненты намагниченности для двух групп разной полярности с кругами доверия. Залитые (незалитые) символы и сплошные (штриховые) линии — проекция на нижнюю (верхнюю) полушару.

са ВЕП [Torsvik, Cocks, 2005]. Полученный на Южном Урале полюс при любом выборе полярности далеко отстоит от фанерозойской кривой (рис. 5).

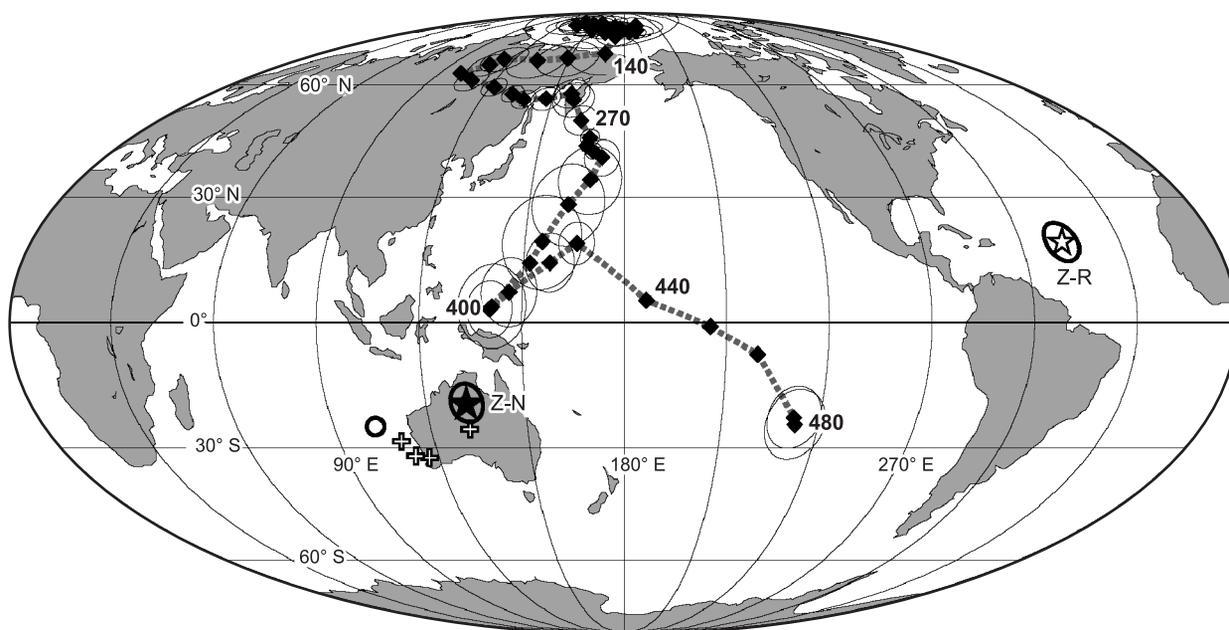
Наиболее важным нам представляется то, что полюсы по одновозрастным породам из других частей ВЕП согласуются с полюсом для Южного Урала. По верхнеэдиакарским породам (550—555 млн лет) юго-восточного побережья Белого моря был получен ряд палеомагнитных полюсов [Popov et al., 2002, 2005; Iglesia-Llanos et al., 2005], хорошо согласующихся с нашим результатом. В эту же группу попадает полюс по вулканитам Южной Волыни [Elming et al., 2007]. Юго-восточное побережье Белого моря и Башкирский мегантиклинорий отстоят друг от друга более чем на 1500 км; не меньшее расстояние отделяет Южный Урал от Волыни. Достаточно сложно представить геологическое событие, которое могло бы привести к одновременному перемагничиванию пород на столь больших расстояниях. Следовательно, положительный тест внешней сходимости указывает на первичность намагниченности во всех трех объектах. Все эти факты позволяют считать, что высокотемпературная компонента намагниченности в зиганской свите является первичной.

#### **ОБЗОР ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ ПО ЭДИАКАРСКИМ КОМПЛЕКСАМ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ**

Прежде чем переходить к обсуждению палеогеографического значения полученных в данной работе результатов, имеет смысл рассмотреть уже опубликованные палеомагнитные данные по эдиакарским породам ВЕП (рис. 6).

Единственный полюс для начала эдиакария получен по дайковому комплексу Эгерсунд на юго-западе Норвегии [Walderhaug et al., 2007]. Породы надежно датированы ( $616 \pm 3$  млн лет, U-Pb по циркону), а палеомагнитный результат подтвержден тестом обожженных контактов.

Карбонатитовые интрузивные комплексы с возрастом около 585 млн лет изучены в двух местах: комплекс Фен на юге Норвегии [Piper, 1988; Meert et al., 1998] и комплекс Ально в Центральной Швеции [Piper, 1981; Meert et al., 2007]. Палеомагнитные данные по комплексу Фен помещают ВЕП в средние широты, однако многие авторы отмечают согласие этого полюса с пермотриасовыми данными по этой же платформе и предполагают перемагничивание комплекса Фен во время магматической активности в расположенном поблизости грабене Осло. При палеомагнитных исследованиях комплекса Ально получены две компоненты намагниченности. Согласно одной из них, ВЕП должна была находиться на полюсе, согласно другой, — в тропиках, что не позволяет использовать эти данные для палеогеографических построений [Meert et al., 2007].



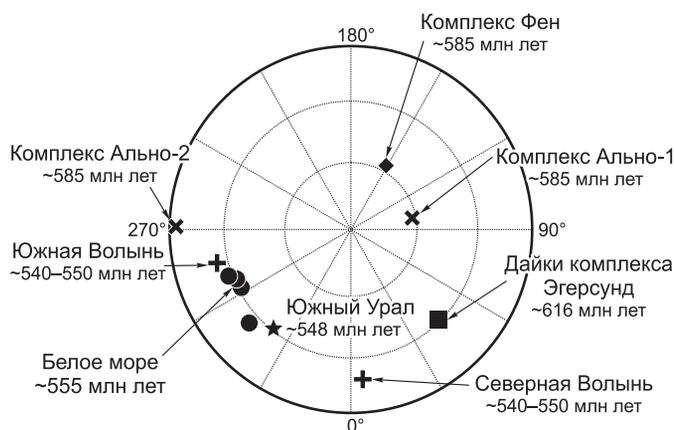
**Рис. 5.** Кривая кажущейся миграции полюса Восточно-Европейской платформы (ромбы и пунктирная линия) от раннего ордовика (480 млн лет) до настоящего времени [Torsvik, Cocks, 2005] и некоторые эдиакарские данные для этой платформы.

Звездочками с кругами доверия обозначены результаты по осадочным породам зиганской свиты для двух вариантов выбора полярности (Z-N и Z-R, пояснения даны в тексте). Кресты — полюсы с возрастом около 550—555 млн лет с ЮВ побережья Белого моря [Popov et al., 2002, 2005; Iglesia-Llanos et al., 2005], круг — полюс с возрастом около 550 млн лет по эдиакарским лавам Южной Волыни [Elming et al., 2007]. Цифры около некоторых полюсов на кривой миграции полюса — возраст в миллионах лет.

В юго-западной части ВЕП, на Волыни, эдиакарские породы представлены толщей лав и туфов мощностью несколько сотен метров, которая перекрыта 200-метровым осадочным чехлом. К сожалению, вулканогенные эдиакарские разрезы Волыни известны почти исключительно по результатам бурения. В двух небольших карьерах на севере Волыни вскрыто четыре лавовых потока, еще два потока вскрыто в южной части региона. За неимением иных объектов, эти потоки изучались несколько раз [Iosifidi et al., 2001; Nawrocki et al., 2004; Elming et al., 2007]. С.А. Элмин с соавторами [Elming et al., 2007] объединили все данные и пришли к заключению, что, согласно результатам с севера Волыни, 560—580 млн лет назад ВЕП находилась в районе полюса; если же верить данным с юга Волыни, то в это время эта часть платформы находилась на широте около 20°. Осадочный разрез, перекрывающий толщу вулканических пород, был изучен А. Иосифиди с соавторами [Iosifidi et al., 2005], которые выде-

**Рис. 6.** Распределение вендских палеомагнитных полюсов Восточно-Европейской платформы (все полюсы спроецированы в Северное полушарие).

Квадрат — дайковый комплекс Эгерсунд на юго-западе Норвегии [Walderhaug et al., 2007]; ромб — комплекс Фен на юге Норвегии [Piper, 1988; Meert et al., 1998]; косой крест — комплекс Ально в Центральной Швеции [Piper, 1981; Meert et al., 2007]; Ально-1 и Ально-2 — полюсы для крутой и пологой компоненты соответственно; прямые кресты — базальты из северной и южной частей Волыни [Elming et al., 2007]; кружки — ЮВ побережье Белого Моря [Popov et al., 2002, 2005]; звездочка — Южный Урал (эта работа). Круги доверия вокруг полюсов не показаны.



лили в этих породах шесть различных компонент намагниченности. Ни возраст, ни точное направление этих компонент определить не удалось, что, к сожалению, не позволяет использовать эти данные.

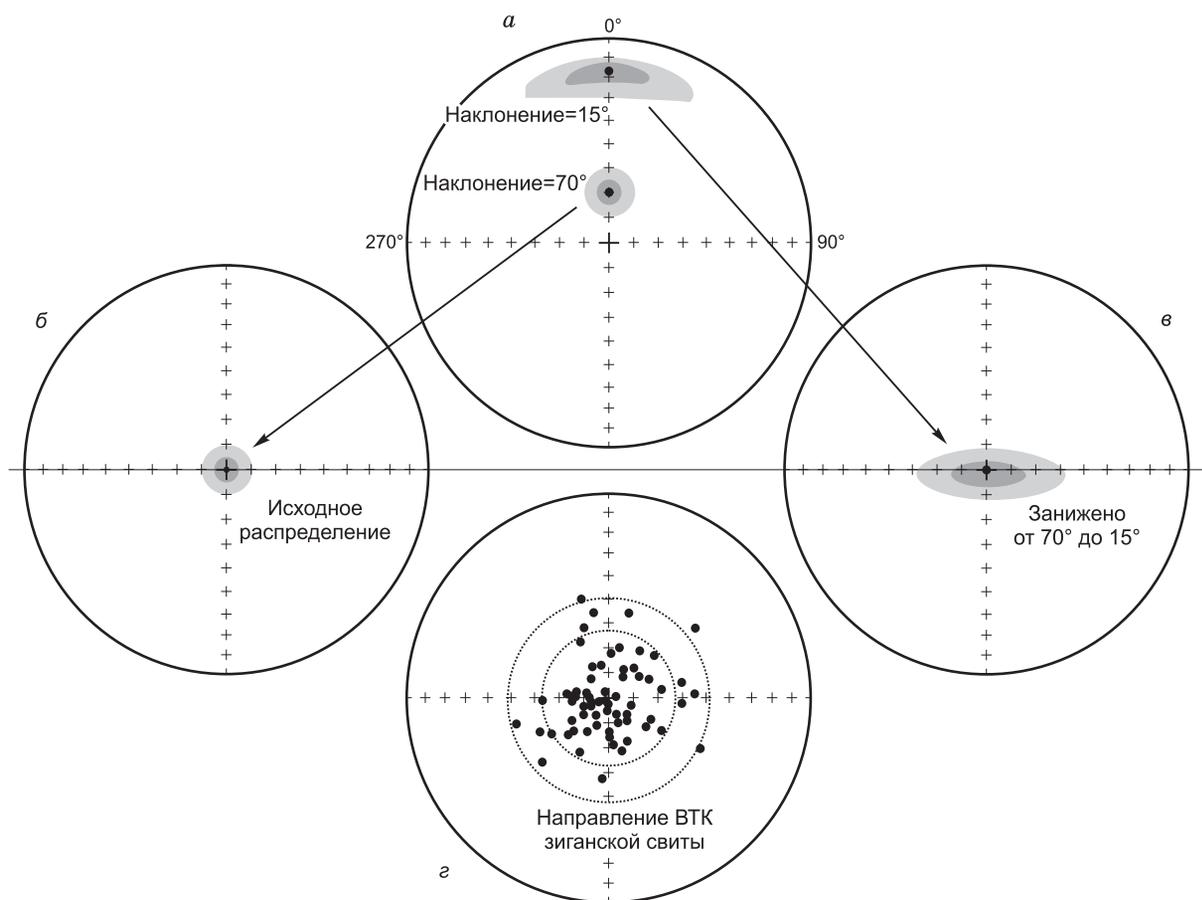
На севере России эдиакарские породы известны на большой территории, но почти исключительно по результатам бурения. По туфовым прослоям из разрезов юго-восточного побережья Белого моря был определен возраст этих пород (около 550—555 млн лет, U-Pb по цирконам [Iglesia-Llanos et al., 2005]; здесь же по ряду обнажений получены достоверные палеомагнитные данные [Popov et al., 2002, 2005; Iglesia-Llanos et al., 2005].

Как уже было показано, полученный нами по верхнеэдиакарским породам полюс (Z) хорошо согласуется с одновозрастными полюсами с юго-восточного побережья Белого моря (W) [Popov et al., 2002, 2005; Iglesia-Llanos et al., 2005], а также с полюсом по верхнеэдиакарским лавам Южной Волыни (V) [Elming et al., 2007]. Все эти полюсы образуют достаточно плотный кластер (ZWV) (см. рис. 5), а средний полюс для этой группы имеет широту  $Plat = 26.9^\circ N$  и долготу  $Plong = 299.2^\circ E$  (кучность  $k = 35$ , радиус круга доверия  $A_{05} = 11.4^\circ$ ,  $N = 6$  полюсов). Некоторый разброс внутри группы полюсов ZWV, возможно, связан с небольшими различиями в возрасте изученных пород.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные выше данные позволяют заключить, что породы зиганской свиты накапливались около 550 млн лет назад и что высокотемпературная компонента намагниченности в этих породах является первичной. Это означает, что в конце эдиакария уральский край ВЕП находился в приэкваториальных широтах.

Насколько правомерна экстраполяция данных по Западному Уралу на всю платформу? Известно, что образования западной части Уральского складчатого пояса очень схожи с отложениями самой плат-



**Рис. 7. Определение занижения наклонений в породах зиганской свиты.**

*a* — теоретическое сравнение распределений направлений в случае сильного занижения наклонений; *б*, *в* — приведенные к полюсу сферы исходное теоретическое распределение (*б*) и распределение после занижения (*в*); для наглядности оттенками серого показаны разные части распределений; *г* — распределение единичных направлений высокотемпературной компоненты в зиганской свите, приведенных к полюсу сферы и единой полярности. Пунктирные круги показаны, чтобы подчеркнуть почти круговую форму этого распределения.

формы. Мезо- и неопротерозойские осадочные породы Башкирского мегантиклинория надежно сопоставляются с отложениями, вскрытыми глубокими скважинами в Предуральском краевом прогибе, а также в восточной части самой Восточно-Европейской платформы. Эти корреляции подтверждены серией сейсмических профилей [Стратотип..., 1983]. Таким образом, западная часть Уральского складчатого пояса является окраиной платформы, хотя и деформированной, и сколько-нибудь значительных перемещений Башкирского мегантиклинория относительно платформы не было. Об этом же свидетельствует и рассмотренная выше сходимость палеомагнитных полюсов по Южному Уралу, Беломорью и Волыни.

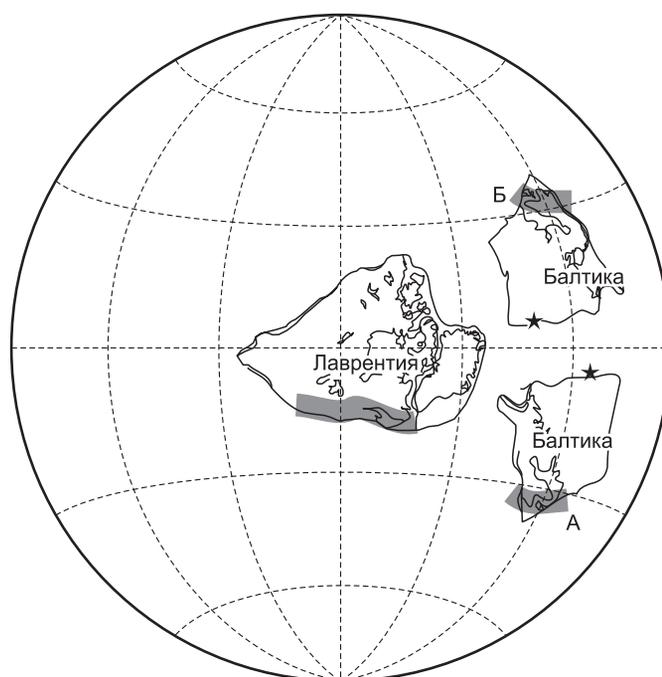
Безусловно, в деформированной окраине платформы возможны локальные повороты отдельных структур. Основные складчатые деформации произошли в пермское время и связаны с образованием Уральского орогена [Пучков, 2003]. Поскольку в разрезах западной части Южного Урала отсутствуют угловые несогласия с подошвы эдиакария до конца ранней перми, можно утверждать, что допермских деформаций в регионе не было. То есть локальные вращения, если они вообще были, должны были происходить в пермское время и, соответственно, должны были сказаться на всех допермских палеомагнитных данных.

Ранее уже проводились исследования, направленные на выявление на западе Южного Урала локальных поворотов относительно Восточно-Европейской платформы (например, [Шипунов, 1998]). Оказалось, что подавляющее большинство изученных разрезов в пределах ошибки метода вообще не повернуты относительно ВЕП, а крайне немногочисленные повороты, скорее всего, связаны с небольшими локальными структурами. Хотя этот вопрос и требует дополнительных исследований, нам кажется более или менее обоснованным утверждение, что отдельные блоки Башкирского мегантиклинория в своем большинстве не испытывали сколько-нибудь заметных перемещений друг относительно друга и относительно Восточно-Европейской платформы. Таким образом, экстраполяция палеомагнитных данных по эдиакарию Башкирского мегантиклинория на Восточно-Европейскую платформу в целом кажется вполне правомерной.

Еще одной существенной проблемой является возможное влияние занижения наклонов на палеомагнитные данные по осадочным породам. Так как это явление широко распространено, игнорировать такую возможность нельзя. Мы попытались оценить возможную величину занижения для данной конкретной коллекции. Если исходное распределение направлений (до занижения) было фишеровским [Fisher, 1953] или близким к нему, то после занижения оно становится удлинненным [Баженов, 1981]. Чем круче было исходное наклонение и чем больше занижение, тем заметнее изменение формы распределения (рис. 7).

Предположим, в эдиакарии ВЕП находилась в высоких широтах, например на широте около  $55^\circ$  (наклонение  $\sim 70^\circ$ ). В таком случае наблюдаемое наклонение  $15^\circ$  должно бы быть результатом сильного занижения. Однако при занижении от  $70^\circ$  до  $15^\circ$  первоначальное круговое распределение с удлинением единица станет сильно вытянутым, с удлинением 8—10 (см. рис. 7, а—в). Наблюдаемое же распределение практически круговое, с удлинением  $\ll 2$ , что статистически незначимо (см. рис. 7, г). Следовательно, сильного занижения не было. Слабого занижения наклонов, на  $5$ — $10^\circ$ , таким способом исключить нельзя, но эффект такого масштаба не может изменить вывода о том, что породы зиганской свиты образовались в приэкваториальных широтах.

Итак, согласно полюсам ZWV группы, ВЕП в конце эдиакария находилась в приэкваториальных широтах Северного или Юж-



**Рис. 8. Возможные положения Восточно-Европейской платформы (Балтики) в соответствии с полученными результатами.**

Буквами А и Б обозначены варианты расположения Балтики в зависимости от выбора полярности. Серым закрашены районы, где известны геологические индикаторы раскрытия океана Япетус [Van der Voo, 1993]. Звездочка — район работ на Южном Урале.

ного полушария. Используя сведения о палеогеографическом положении других плит в конце эдиакария, можно попробовать определить полярность палеомагнитных данных. Достаточно уверенно установлено, что в интервале 615—550 млн лет назад между Лаврентией, Гондваной и ВЕП начал раскрываться океан Япетус. Свидетельствующие об этом рифтогенные комплексы имеются на Британских островах, в Норвегии, а также в северной части Аппалачей [Cawood et al., 2001; McCausland et al., 2007; Cocks, Torsvik, 2011]. Представления о процессе раскрытия Япетуса достаточно противоречивы, но для Лаврентии два палеомагнитных результата с возрастом 550—555 млн лет [McCausland, Hodych, 1998; Van Alstine, Gillet, 1979] помещают ее на экватор.

Если бы ВЕП в конце эдиакария располагалась в Северном полушарии, расстояние между двумя бортами Япетуса составляло бы более 5000 км (рис. 8, вариант А). Такая конфигурация представляется маловероятной, гораздо более правдоподобным кажется, что ВЕП находилась в приэкваториальных широтах Южного полушария (см. рис. 8, вариант Б).

## ВЫВОДЫ

Исходя из вышеизложенных фактов, с достаточной степенью уверенности можно утверждать:

1. Зиганская свита имеет возраст около 550 млн лет.
2. Высокотемпературную намагниченность в зиганской свите можно считать первичной.
3. Полученный полюс можно экстраполировать на всю Восточно-Европейскую платформу.
4. Сильного занижения наклонений в породах зиганской свиты не было.
5. Среднему направлению высокотемпературной намагниченности зиганской свиты соответствует палеоширота около  $10 \pm 3^\circ$ . Значит, в конце эдиакария Восточно-Европейская платформа находилась в приэкваториальных широтах.

Мы благодарим многих наших коллег из Института геологии в Уфе за бесценную информацию по геологии Башкирского мегантиклинория и помощь в проведении полевых работ. Как всегда, мы признательны Н.Я. Дворовой и О.А. Крежовских за работу по размагничиванию палеомагнитных коллекций. Мы признательны Д.В. Метелкину и анонимному рецензенту за огромную работу, которую они проделали, помогая нам улучшить эту статью.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 11-05-00037, 11-05-00137), программы № 10 Отделения наук о Земле РАН, и Национального Научного Фонда США, грант EAR11-19038.

## ЛИТЕРАТУРА

- Баженов М.Л.** Занижение наклонений в палеогеновых песчаниках Южного Дарваза // ДАН, 1981, т. 260, с. 1336—1339.
- Беккер Ю.Р.** Докембрийские молассы, Л., Недра, 1988, 289 с.
- Беккер Ю.Р.** Древнейшая эдиакарская биота Урала // Изв. АН СССР, Сер. геол., 1992, № 6, с. 16—24.
- Беккер Ю.Р.** Открытие эдиакарской фауны в самых верхних вендских отложениях Южного Урала // Региональная геология и металлогения, 1996, № 5, с. 111—131.
- Гражданкин Д.В., Марусин В.В., Меерт Д., Крупенин М.Т., Маслов А.В.** Котлинский горизонт на Южном Урале // ДАН, 2011, т. 440, № 2, с. 201—206.
- Геологическая карта** Российской Федерации и прилегающей части Республики Казахстан / Ред. В.И. Козлов. М-б 1:1 000 000 (новая серия). Лист N-40 (41) (Уфа) СПб., ВСЕГЕИ, 2002.
- Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю.** Тектоническая эволюция Сибирского палеоконтинента от неопротерозоя до позднего мезозоя: палеомагнитная запись и реконструкции // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (7), с. 883—899.
- 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.
- Соколов Б.С.** Хроностратиграфическое пространство литосферы и венд как геисторическое подразделение неопротерозоя // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (10), с. 1334—1348.
- Стратотип рифея.** Стратиграфия. Геохронология / Под ред. Б.М. Келлера, Н.М. Чумакова. М., Наука, 1983, 184 с.
- Шипунов С.В.** История складчатости Южного Урала по палеомагнитным данным // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород, М., ОИФЗ РАН, 1998, с. 69—71.
- Abrajevitch A., Van der Voo R.** Incompatible Ediacaran paleomagnetic directions suggest an equatorial geomagnetic dipole hypothesis // Earth Planet. Sci. Lett., 2010, v. 293, p. 164—170.
- Cawood P.A., McCausland P.J.A., Dunning G.R.** Opening Iapetus: constraints from the Laurentian margin in Newfoundland // Geol. Soc. Amer. Bull., 2001, v. 113, p. 443—453.

- Cocks L.R.M., Torsvik T.H.** The Palaeozoic geography of Laurentia and western Laurussia: a stable craton with mobile margins // *Earth Sci. Rev.*, 2011, v. 106, p. 1—51.
- Cogne J.P.** PaleoMac: a Macintosh application for treating paleomagnetic data and making plate reconstructions // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2003, v. 4(1), p. 1007, doi:10.1029/2001GC000227.
- Crimes T.P.** The record of trace fossils across the Proterozoic-Cambrian boundary // *Origin and early evolution of the Metazoa*, New York, Plenum Press, 1992, p. 177—202.
- Elming S.-A., Kravchenko S., Layer P., Rusakov O., Glevasskaya A., Mikhailova N., Bachtadse V.** Palaeomagnetism and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age determinations of the Ediacaran traps from the southwestern margin of the East European Craton, Ukraine: relevance to the Rodinia break-up // *J. Geol. Soc. (Lond.)*, 2007, v. 164, p. 969—982.
- Evans D.A.** True Polar wander: a supercontinental legacy // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1998, v. 157, p. 1—8.
- Evans D.A.** Stratigraphic, geochronological, and paleomagnetic constraints upon the Neoproterozoic climatic paradox // *Amer. J. Sci.*, 2000, v. 300, p. 347—433.
- Fisher R.A.** Dispersion on a sphere, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 1953, 217, 295—305.
- Hoffman P.F., Kaufman A.J., Halverson G.P., Schrag D.P.** A Neoproterozoic snowball Earth // *Science*, 1998, v. 281, p. 1342—1346.
- Iglesia-Llanos M.P., Tait J.A., Popov V., Abalmasova 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.
- Iosifidi A., Bachtadse V., Khramov A., Kuznetsova A.** Paleomagnetic data for Vendian basalts from Ukraine, 3rd International Conference on Problems of Geocosmos, Abstracts Volume, St. Petersburg, 2001, p. 74—75.
- Iosifidi A.G., Khramov A.N., Bachtadse V.** Multicomponent magnetization of Vendian sedimentary rocks in Podolia, Ukraine // *Russ. J. Earth. Sci.*, 2005, № 7, p. 1—14.
- Kirschvink J.L.** The least-square line and plane and the analysis of palaeomagnetic data // *Geophys. J. Royal Astron. Soc.*, 1980, v. 62, p. 699—718.
- Kirschvink J.L., Ripperdan R.L., Evans D.A.** Evidence for a large-scale reorganization of Early Cambrian continental masses by inertial interchange true polar wander // *Science*, 1997, v. 277, p. 541—545.
- Knoll A.H.** Learning to tell Neoproterozoic time // *Precam. Res.*, 2001, v. 100, p. 3—10.
- Kosler J., Sylvester P.J.** Present trends and the future of zircon in geochronology: laser ablation ICPMS, zircon // *Rev. Miner. Geochem.*, 2003, v. 53, p. 243—271.
- Li Z.X., Bogdanova S.V., Davidson A., Collins A.S., De Waele B., Ernst R.E., Fitzsimons I.C.W., Fuck R.A., Gladkochub D.P., Jacobs J., Karlstrom K.E., Lu S., Natapov L.M., Pease V., Pisarevsky S.A., Thrane K., Vernikovsky V.A.** Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis // *Precam. Res.*, 2008, v. 160, p. 179—210.
- Ludwig K.R.** Users manual for ISOPLOT, a geochemical toolkit for Microsoft Excel version 3.09a, 2004.
- McCall G.J.H.** The Vendian (Ediacaran) in the geological record: enigmas in geology's prelude to the Cambrian explosion // *Earth Sci. Rev.*, 2006, v. 77, p. 1—229.
- McCausland P.J.A., Hodych J.P.** Palaeomagnetism of the 550 Ma Skinner Cove volcanics of western Newfoundland and opening of the Iapetus Ocean // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1998, v. 163, p. 15—29.
- McCausland P.J.A., Van der Voo R., Hall C.M.** Circum-Iapetus paleogeography of the Precambrian—Cambrian transition with a new paleomagnetic constraint from Laurentia // *Precam. Res.*, 2007, v. 156, p. 125—152.
- McElhinny M.W.** Statistical significance of the fold test in palaeomagnetism // *Geophys. J. Royal Astron. Soc.*, 1964, v. 8, p. 338—340.
- McFadden P.L., McElhinny M.W.** Classification of the reversal test in paleomagnetism // *Geophys. J. Intern.*, 1990, v. 103, p. 725—729.
- Meert J.G.** A paleomagnetic analysis of Cambrian true polar wander // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, v. 168, p. 131—144.
- Meert J.G.** Ediacaran—Early Ordovician paleomagnetism of Baltica // *A review, Gondwana Research*, 2013, ISSN 1342-937X, 10.1016/j.gr.2013.02.003.
- Meert J.G., Tamrat E.** A mechanism for explaining rapid continental motion in the Late Neoproterozoic / Eds. P.G. Eriksson, W. Altermann, D.R. Nelson, W.U. Mueller, O. Cantunéanu. *The Precambrian Earth: tempos and events, developments in Precambrian geology* 12, Elsevier, Amsterdam, 2004, p. 255—267.

- Meert J.G., Torsvik T.H., Eide E.A., Dahlgren S.** Tectonic significance of the Fen Province, S. Norway: constraints from geochronology and paleomagnetism // *J. Geol.*, 1998, v. 106, p. 553—564.
- Meert J.G., Walderhaug H.J., Torsvik T.H., Hendriks B.W.H.** Age and paleomagnetic signature of the Alnön carbonatite complex (NE Sweden): additional controversy for the Neoproterozoic paleoposition of Baltica // *Precam. Res.*, 2007, v. 154, p. 159—174.
- Nawrocki J., Boguckij A., Katinas V.** New Late Vendian palaeogeography of Baltica and the TESZ // *Geol. Quart.*, 2004, v. 48 (4), p. 309—316.
- Paces J.B., Miller J., D., Jr.** Precise U-Pb ages of Duluth complex and related mafic intrusions, Northeastern Minnesota: geochronological insights to physical, petrogenetic, paleomagnetic, and tectonomagmatic processes associated with the 1.1 Ga midcontinent rift system // *J. Geophys. Res.*, 1993, v. 98, № 13, p. 997—14, 013.
- Piper J.D.A.** Magnetic properties of the Alnön complex // *Geol. Foren. Stock. Forhandlingar*, 1981, v. 103, p. 9—15.
- Piper J.D.A.** Paleomagnetism of (late Vendian—earliest Cambrian) minor alkaline intrusions, Fen Complex, southeast Norway // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1988, v. 90, p. 422—430.
- Pisarevsky S.A., Murphy J.B., Cawood P.A., Collins A.S.** Late Neoproterozoic and Early Cambrian palaeogeography: models and problem / Eds. R.J. Pankhurst, R.A.J. Trouw, B.B. BritoNeves, M.J. de Wit // *West Gondwana: pre-Cenozoic correlations across the South Atlantic Region. Geol. Soc., Spec. Publ.*, v. 294, p. 9—31.
- Popov V., Iosifidi A., Khramov A., Tait J., Bachtadse 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.*, 2002, v. 107, 10.1029/2001JB001607.
- 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 J. Earth Sci.*, 2005, v. 2, p. 1—29.
- Schmidt P.W., Williams G.E.** Ediacaran palaeomagnetism and apparent polar wander path for Australia: no large true polar wander // *Geophys. J. Intern.*, 2010, v. 182, p. 711—726.
- Simonetti A., Heaman L.M., Hartlaub R.P., Creaser R.A., MacHattie T.G., Bohm C.** U-Pb zircon dating by laser ablation-MC-ICP-MS using a new multiple ion counting Faraday collector array // *J. Anal. Atomic Spect.*, 2005, v. 20, p. 677—686.
- Torsvik T.H., Cocks L.R.M.** Norway in space and time: a Centennial cavalcade // *Norwegian J. Geol.*, 2005, v. 85, p. 73—86.
- Van Alstine D.R., Gillett S.L.** Paleomagnetism of the upper Precambrian sedimentary rocks from the Desert Range, Nevada // *J. Geophys. Res.*, 1979, v. 84, p. 4490—4500.
- Van der Voo R.** Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus oceans, Cambridge University Press, Cambridge, 1993, 411 p.
- Walderhaug H.J., Torsvik T.H., Halvorsen E.** The Egersund dykes (SW Norway): a robust Early Ediacaran (Vendian) palaeomagnetic pole from Baltica // *Geophys. J. Intern.*, 2007, v. 168, p. 935—948.
- Williams I.S.** U-Th-Pb Geochronology by ion microprobe // *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes // Rev. Econ. Geol.*, 1998, v. 7, p. 1—35.
- Zijderveld J.D.A.** AC demagnetization of rocks: analysis of results // *Methods in paleomagnetism. Elsevier, Amsterdam*, 1967, p. 254—286.

*Рекомендована к печати 21 февраля 2013 г.  
Д.В. Метелкиным*

*Поступила в редакцию  
25 декабря 2012 г.*