

УДК 550.384:551.736.3(470)

НОВЫЙ 254 МЛН ЛЕТ ПАЛЕОМАГНИТНЫЙ ПОЛЮС ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ: МОСКОВСКАЯ СИНЕКЛИЗА, РАЗРЕЗЫ СУХОБОРКА И СОСНОВКА

© 2023 г. А. М. Фетисова^{1,2,*}, Р. В. Веселовский^{1,2}, В. К. Голубев³

Представлено академиком РАН Л.Н. Когарко 27.01.2023

Поступило 10.02.2023 г.

После доработки 17.02.2023 г.

Принято к публикации 21.02.2023 г.

Представлены результаты палеомагнитных и петромагнитных исследований красноцветных осадочных пород верхней перми разрезов Сухоборка и Сосновка, расположенных на юго-восточном борту Московской синеклизы на правом берегу р. Ветлуга в Нижегородской области. Приведены доводы в пользу первичности характеристической компоненты намагниченности и вычислен первый надежно датированный позднепермский (254 млн лет) палеомагнитный полюс для осадочного пермо-триасового комплекса восточной части Восточно-Европейской платформы: 56.731° с.ш., 45.748° в.д., $N = 44$, $plat = 55.3^\circ$, $plong = 158.1^\circ$, $dp/dm = 3.5^\circ/5.1^\circ$, $paleolat = 34.6^\circ$.

Ключевые слова: палеомагнетизм, Восточно-Европейская платформа, Русская плита, пермь, палеомагнитный полюс

DOI: 10.31857/S2686739723600194, **EDN:** UKLAON

Отвечающие современным критериям качества и надежности палеомагнитные полюсы Восточно-Европейской платформы (ВЕП) для интервала 260–240 млн лет назад крайне немногочисленны и получены, преимущественно, по осадочным комплексам “стабильной” (внеальпийской) Европы [1–3] без точной геохронологической привязки. Это существенно усложняет разработку пермо-триасового сегмента кривой кажущейся миграции палеомагнитного полюса ВЕП, которая является основой для решения ряда насущных задач, в частности, оценки масштаба пост-палеозойских относительных движений ВЕП и Сибири [4, 5], а также Лаврентии в составе Лавразии (Евразии). Терригенный пермо-триасовый комплекс Русской плиты ВЕП давно и активно изучается палеомагнитным методом, и по нему в последние годы получен ряд палеомагнитных полюсов [6–8], однако их возраст определяется стратиграфической позицией (нередко – не-

однозначной) соответствующих разрезов и не может рассматриваться как достаточно точный. В связи с этим получение новых надежных палеомагнитных определений для ВЕП, возраст которых определен с высокой точностью посредством изотопно-геохронологических методов, является актуальной задачей.

Объектом данного исследования является разрез осадочных пород верхней перми Сухоборка (Нижегородская область, 56.731° с.ш., 45.748° в.д.), расположенный на юго-восточном крыле Московской синеклизы ВЕП, в котором ранее был обнаружен пепловый горизонт с цирконами первично магматического облика, средневзвешенный возраст которых, определенный методом U-Pb CA-ID-TIMS, составил 253.95 ± 0.06 млн лет [9]. Разрез, общей мощностью ~10 м (рис. 1), сложен континентальными, преимущественно аллювиальными отложениями и представлен пестроцветными песками с небольшими прослоями красноцветных алевролитов и глин. Верхняя часть разреза охарактеризована остатками остракод, конхострак, двустворчатых моллюсков, рыб и тетрапод нефедовского горизонта верхневятского подъяруса [9–11]. Пепловый прослой расположен в средней части разреза и представлен слоем темно-бордовых (вишневых) бентонитовых глин мощностью 11–12 см. Всего из пеплового горизонта было отобрано 37 ориентированных образцов: 18 образцов было отобрано в кварцевые

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

³Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: anna-fetis@ya.ru

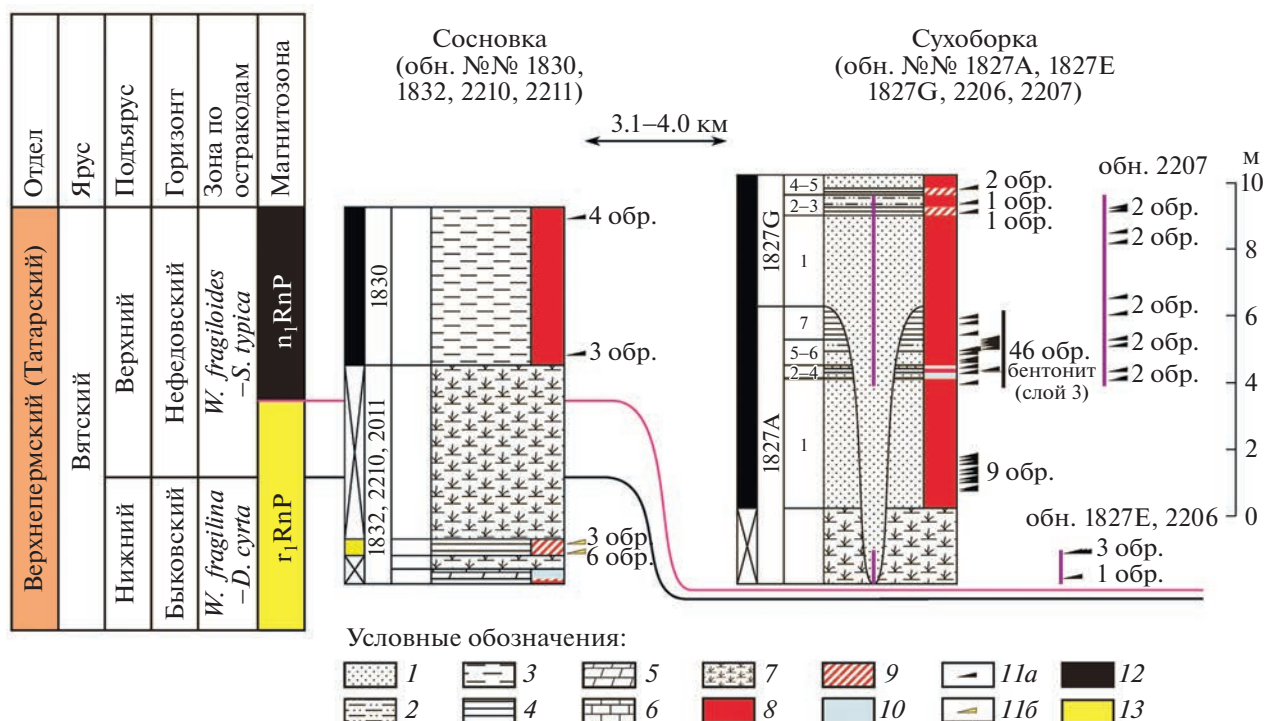


Рис. 1. Интервалы опробования разрезов Сухоборка и Сосновка и количество отобранных образцов. Номера обозначений даны (по В.К. Голубеву). Условные обозначения: 1 – песок; 2 – алеврит песчаный; 3 – алеврит глинистый; 4 – глина; 5 – мергель; 6 – известняк; 7 – осыпь; 8 – красноцветы; 9 – пестроцветы; 10 – сероцветы; 11 – уровни отбора палеомагнитных образцов с характеристической компонентой ЕОН: прямой полярности (а), обратной полярности (б); 12 – зоны прямой (N) полярности; 13 – зоны обратной (R) полярности.

колбы и 19 образцов – в пластиковые контейнеры. Кроме того, из перекрывающих и подстилающих пепловый горизонт пород было отобрано 36 ориентированных образцов; суммарный интервал опробования в разрезе Сухоборка составил 12 м.

Самая нижняя часть разреза Сухоборка во время полевых сезонов 2020 и 2022 г. находилась ниже уровня воды в р. Ветлуга, поэтому соответствующий ей стратиграфический интервал, а также вышележащие породы были опробованы в смежном разрезе Сосновка, расположенном в 3.1–4.0 км ниже по течению реки (56.725° с.ш., 45.806° в.д.). Нижняя часть этого разреза (рис. 1) охарактеризована остракодами верхней части быковского горизонта нижневятского подъяруса [9–11]. В разрезе Сосновка из интервала разреза общей мощностью около 10 м было отобрано 16 ориентированных образцов. Общий объем палеомагнитной коллекции составил 89 ориентированных образцов.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Отбор палеомагнитных образцов производился вручную с помощью ножа, лопаты, геологического молотка, а также пластиковых и стеклянных кон-

тейнеров; ориентировались образцы магнитным компасом, поправка за местное склонение рассчитана по модели IGRF (13 поколение). Лабораторные петромагнитные и палеомагнитные исследования проводились на оборудовании ЦКП ИФЗ РАН [12] согласно современной методике [13]. Для всех образцов кубической формы выполнены измерения анизотропии магнитной восприимчивости, выявившие плоскостной тип магнитной текстуры, характерной для осадочных пород. Результаты проведенных для наиболее характерных образцов экспериментов по оценке температурной зависимости магнитной восприимчивости и намагниченности насыщения, а также параметры петли гистерезиса и кривых нормального намагничивания, свидетельствуют о присутствии в породах трех магнитных минералов – магнетита, маггемита и гематита. Этот вывод подтверждается рентгенофазовым анализом: в пепловом горизонте носителями естественной остаточной намагниченности (ЕОН) являются маггемит (69%) и гематит (31%), а в алевритах и песчаниках – магнетит (74–84%) и гематит (16–26%).

Образцы кубической формы с ребром 2 см и в стеклянных колбах были подвергнуты детальной (до 14 шагов) температурной магнитной чистке (TD) до полного размагничивания, а образцы в

Таблица 1. Палеомагнитные направления и полюсы, полученные по сводному разрезу “Сухоборка” (разрезы Сухоборка и Сосновка)

Объект	Палеомагнитное направление				
	<i>n</i>	D (°)	I (°)	K	$\alpha 95$ (°)
Чистка переменным магнитным полем (AF)	34	36.7	62.1	39.5	4.0
Температурная чистка (TD), N-полярность	24	36.0	56.5	28.7	5.6
Температурная чистка (TD), R-полярность	20	223.8	–51.2	72.9	3.8
Температурная чистка (TD)	44	39.8	54.1	37.7	3.6
Температурная чистка (TD) при $f = 0.6$	44	39.8	66.5	37.7	3.6
Температурная чистка (TD) при $f = 0.9$	44	39.8	56.9	37.7	3.6

Палеомагнитный полюс “Сухоборка”:

slat = 56.731°, slong = 45.748°, plat = 55.3°, plong = 158.0°, dp/dm = 3.5°/5.1°, paleolat = 34.6°

Палеомагнитный полюс “Сухоборка” при $f = 0.6$:

plat = 65.2°, plong = 136.8°, dp/dm = 4.9°/5.9°, paleolat = 49.0°

Палеомагнитный полюс “Сухоборка” при $f = 0.9$:

plat = 57.5°, plong = 154.8°, dp/dm = 3.8°/5.2°, paleolat = 37.5°

Полюс “Сухоборка-N”: plat = 59.1°, plong = 159.8°, dp/dm = 5.9°/8.1°, paleolat = 37.1°

Полюс “Сухоборка-R”: plat = 51.1°, plong = 156.4°, dp/dm = 3.5°/5.1°, paleolat = 31.9°

Примечание: *n* – число единичных палеомагнитных направлений (число образцов); D, I – склонение и наклонение соответственно; K – кучность; $\alpha 95$ – радиус круга 95% доверия; slat, slong – координаты места отбора образцов; plat, plong – широта и долгота палеомагнитного полюса; dp/dm – полуоси овала 95% доверия; paleolat – палеоширота места отбора образцов; AF, TD – магнитные чистки переменным магнитным полем и температурой соответственно; N, R – прямая и обратная полярности характеристической компоненты намагниченности (ChRM); f – коэффициент занижения наклонения.

пластиковых контейнерах – магнитной чистке переменным полем (AF) с амплитудой до 200 мТл. Для образцов из пеплового горизонта AF-чистка оказалась неэффективной; в остальных случаях AF-чисткой разрушается до 90% ЕОН. Компонентный анализ результатов обоих типов магнитной чистки позволяет выделить наиболее стабильную характеристическую компоненту ЕОН (ChRM), разрушающуюся в интервале температур 300–630°C (рис. 2 а, б) или в интервале амплитуд переменного магнитного поля 20–110 мТл (рис. 2 в). Важно отметить, что полярность ChRM в разрезе Сухоборка прямая (N) (рис. 2 а), а в разрезе Сосновка – прямая в верхней его части (рис. 2 в) и обратная (R) – в нижней части (рис. 2 б). С учетом биостратиграфических данных, прямо намагниченные отложения соответствуют субзоне p_1RnP региональной магнитостратиграфической шкалы, а обратно намагниченные – субзоне r_1RnP (рис. 1).

Распределение единичных направлений выделенной в образцах из разрезов Сухоборка и Сосновка ChRM представлено на рис. 2 г, д. Для вычисления среднего палеомагнитного направления для обоих разрезов (рис. 2 г; табл. 1) использованы только результаты температурной магнитной чистки (рис. 2 г), поскольку направления ChRM, полученные по данным AF-чистки (рис. 2 д), имеют более высокие, чем ожидаемые,

положительные наклонения, что может являться результатом неполного разделения вязкой компоненты намагниченности и ChRM. Направления ChRM прямой и обратной полярности близки к антиподальности: $\gamma/\gamma_{cr} = 7.0^\circ/7.0^\circ$ [14]. Учитывая биполярное распределение направлений характеристической компоненты намагниченности, наличие характерной для осадочных пород магнитной текстуры, близость вычисленного среднего палеомагнитного направления к ожидаемому [5–7], мы полагаем возраст ChRM древним, отвечающим времени накопления пород разрезов Сухоборка и Сосновка. Мощность опробованного интервала разреза позволяет полагать, что вычисленный по среднему палеомагнитному направлению полюс “Сухоборка” (табл. 1; рис. 3) является палеомагнитным. Действительно, согласно оценкам скорости осадконакопления разрезов с подобной литологией [15], опробованная 12-метровая толща накапливалась никак не менее 10 000 лет, а скорее всего, значительно дольше, что позволяет считать вековые вариации усредненными в палеомагнитной записи.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные вновь поднимают вопрос о надежности и тектонической интерпретации пермо-триасовых палеомагнитных полюсов ВЕП, полученных по осадочным комплексам

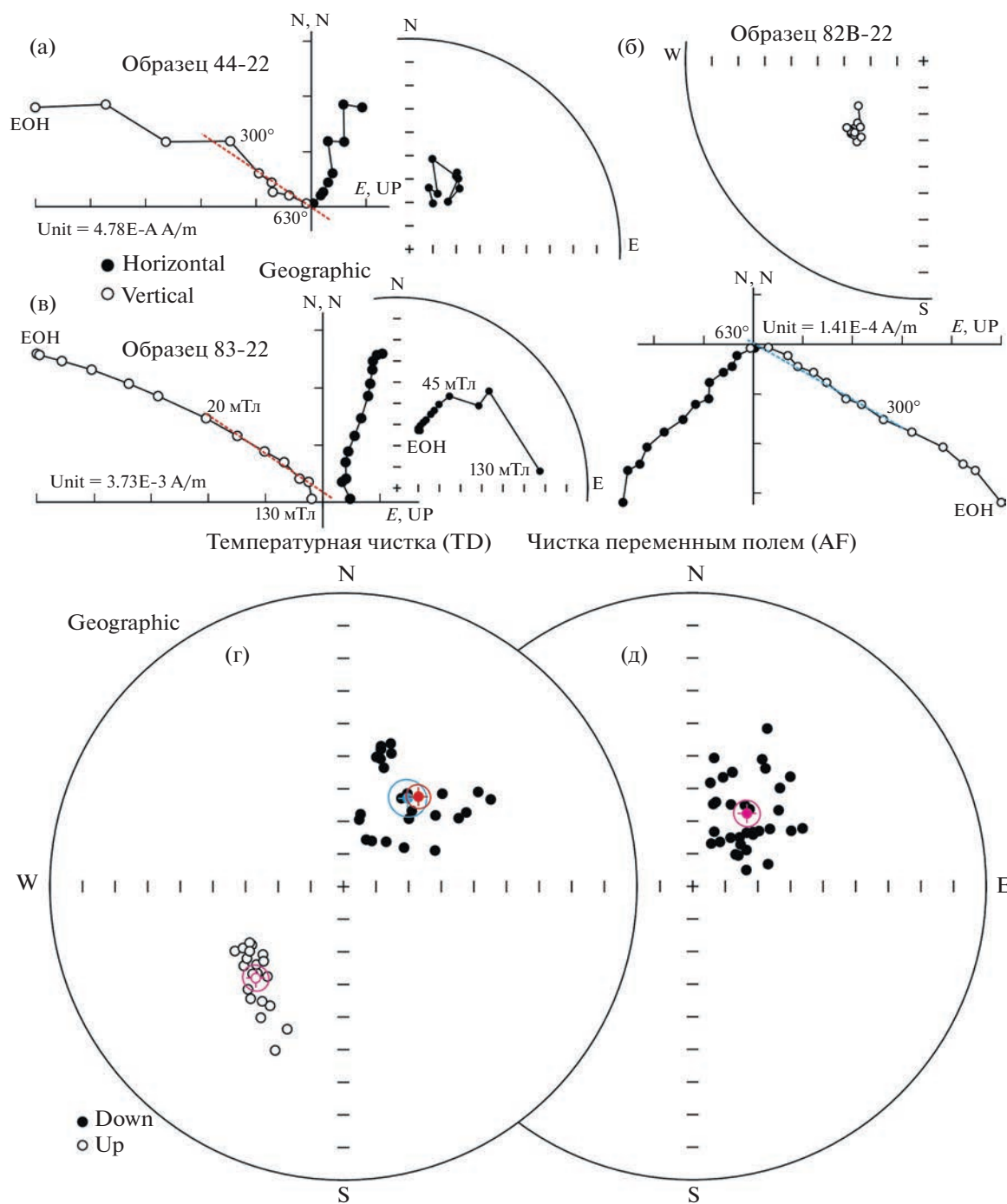


Рис. 2. Результаты палеомагнитных исследований. (а–в) — диаграммы Зийдervельда и стереограммы, иллюстрирующие процесс ступенчатой магнитной чистки образцов: температурной (а, б) и переменным полем (в). Географическая (современная) система координат. (а, в) — пример образца с характеристической компонентой намагниченности (ChRM) прямой полярности; (б) — пример образца с ChRM обратной полярности. (г, д) — распределение единичных направлений ChRM и средние палеомагнитные направления компонент прямой (синий цвет), обратной (розовый цвет, пустой кружок), а также прямой и обращенной обратной (красный цвет) полярности с кругами 95% доверия. Залитые (пустые) кружки на стереограммах — проекция вектора на нижнюю (верхнюю) полусферу; залитые (пустые) кружки на диаграммах Зийдervельда — проекции вектора на горизонтальную (вертикальную) плоскости. Образец 44-22 — обнажение № 1827А (Сухоборка), слой 3 (бентонит), 7 см ниже кровли. Образец 82В-22 — обнажение № 2211 (Сосновка). Образец 83-22 — обнажение № 1830 (Сосновка), нижний уровень.

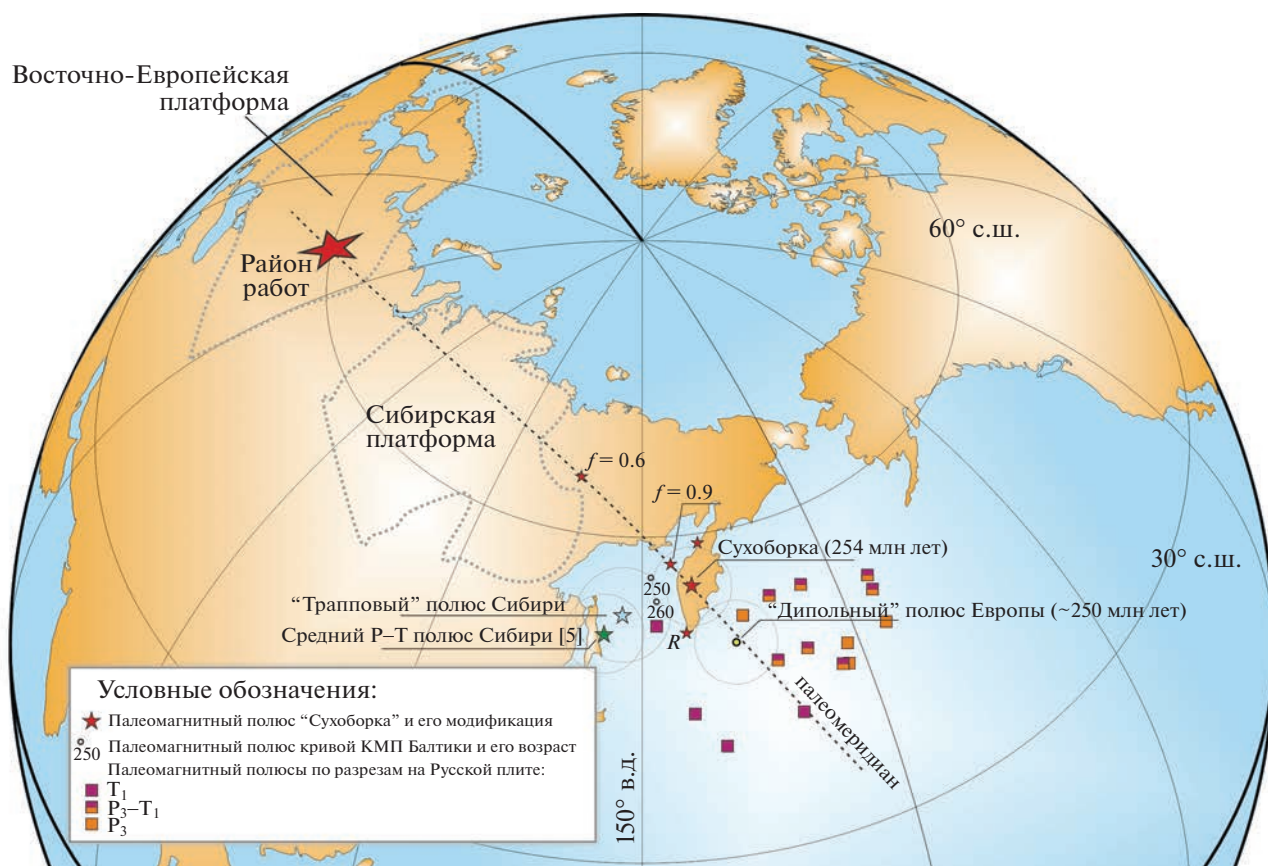


Рис. 3. Палеомагнитный полюс Восточно-Европейской платформы “Сухоборка” (254 млн лет) и полюсы, обсуждаемые в тексте статьи: “дипольный” полюс Европы [1]; “трапповый” полюс Сибири [16]; полюсы кривой кажущейся миграции палеомагнитного полюса ВЕП и их возраст по [2]; “R” и “N” – полюсы “Сухоборка”, вычисленные по направлениям обратной или прямой полярности соответственно; “ $f=0.6$ ” и “ $f=0.9$ ” – полюс “Сухоборка”, скорректированный с учетом занижения наклона с коэффициентом $f=0.6$ и $f=0.9$ соответственно. Цветными квадратами показаны палеомагнитные полюсы ВЕП, полученные по объектам в пределах Русской плиты в работах [6–8], цвет соответствует возрасту полюса. Серые окружности – круги 95% доверия.

Русской плиты [6–8] (рис. 3). Эти полюсы, хотя и являются почти одновозрастными позднепермскому (254 млн лет) полюсу “Сухоборка”, но существенно отличаются от него, располагаясь на расстояниях до 30° дуги большого круга к ЮВ (рис. 3). Среди возможных причин такого распределения полюсов традиционно рассматриваются (1) наличие пост-пермских вращений ВЕП или отдельных ее тектонических блоков [4, 5], а также (2) эффект занижения наклона в осадочных породах. Детальный анализ перечисленных факторов требует отдельного рассмотрения, однако необходимо отметить, что полюс “Сухоборка” не отличается от среднего пермо-триасового “траппового” полюса Сибири [16], но отличается от ее среднего пермо-триасового полюса, вычисленного с использованием расширенной выборки единичных полюсов [5] (рис. 3). Это свидетельствует о том, что вопрос о масштабе относительных перемещений Восточно-Европейской и Сибирской платформ в мезозое и кайнозое остается откры-

тым. Кроме того, полюс “Сухоборка” не отличается от “дипольного” полюса Европы [1] (рис. 3), вклады эффекта занижения наклона и недипольных компонент главного магнитного поля Земли в котором исключены. Также полюс “Сухоборка” не отличается от полюсов с возрастом 260 и 250 млн лет кривой кажущейся миграции палеомагнитного полюса Балтики (рис. 3), при вычислении которых палеомагнитные направления, полученные по осадочным породам, были скорректированы с учетом эффекта занижения наклона с коэффициентом $f=0.6$ [2]. Касаясь вопроса о занижении наклона в осадочных породах, заметим, что объем выборки полученных нами единичных палеомагнитных направлений не позволяет применить к ним статистический метод E/I для непосредственной оценки коэффициента занижения наклона в породах разрезов Сухоборка и Сосновка. Однако в случае внесения поправки на занижение наклона с коэффициентом $f=0.6$, палеомагнитный полюс

“Сухоборка” существенно смещается от своего ожидаемого положения (рис. 3), поэтому указанное значение f неприменимо к изученным породам. В то же время палеомагнитный полюс “Сухоборка” допускает использование значения коэффициента занижения наклона f в породах пермо-триасового комплекса Русской плиты в интервале 0.8–0.9, вычисленного ранее непосредственно для разрезов Клыково, Жуков овраг и Гаврино [6, 7].

В заключение отметим, что в качестве одной из возможных причин различия пермо-триасовых палеомагнитных полюсов осадочных комплексов ВЕП авторы работы [1] рассматривают неполное удаление вязкой компоненты в ходе процедуры магнитной чистки, в связи с чем палеомагнитные направления обратной полярности, которые преобладают в позднепермских интервалах разрезов Русской плиты, могут быть занижены. Действительно, применительно к полученным данным, координаты полюсов, соответствующих средним направлениям ChRM прямой (“Сухоборка-N”) и обратной (“Сухоборка-R”) полярности изученного нами сводного разреза Сухоборка-Сосновка, отличаются друг от друга на расстояние $\sim 10^\circ$ (рис. 3). Однако такое распределение полюсов принципиально не влияет на полученный результат: рассматриваемые полюсы “Сухоборка-N” и “Сухоборка-R” значимо отличаются от большинства пермо-триасовых полюсов ВЕП. Тем не менее упомянутый эффект, очевидно, не должен игнорироваться при вычислении палеомагнитных полюсов, полученных по распределениям палеомагнитных направлений разной полярности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны А.Н. Диденко (ГИН РАН) за ценные замечания к исходному тексту статьи.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования проведены при поддержке гранта РНФ № 22-27-00597.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bazhenov M.L., Shatsillo A.V.* Late Permian palaeomagnetism of Northern Eurasia: data evaluation and a single-plate test of the geocentric axial dipole model // *Geophysical Journal International*. 2010. V. 180. P. 136–146. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04379.x>
2. *Torsvik T.H., Van der Voo R., Preeden U., et al.* Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics // *Earth-Sci. Rev.* 2012. V. 114. № 3–4. P. 325–368. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.007>
3. *Evans M.E., Pavlov V., Veselovsky R., et al.* Late Permian paleomagnetic results from the Lodève, Le Luc, and Bas-Argens Basins (southern France): magnetostratigraphy and geomagnetic field morphology // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.09.002>
4. *Метелкин Д.В., Казанский А.Ю., Брагин В.Ю. и др.* Палеомагнетизм позднепермских интрузий Минусинского прогиба (Южная Сибирь) // *Геология и геофизика*. 2007. Т. 48. № 2. С. 238–253.
5. *Диденко А.Н.* Анализ мезозойско-кайнозойских палеомагнитных полюсов и траектория кажущейся миграции полюса Сибири // *Физика Земли*. 2015. № 5. С. 65–79. <https://doi.org/10.7868/S000233371505004X>
6. *Фетисова А.М., Веселовский Р.В., Scholze F. и др.* Новый пермо-триасовый палеомагнитный полюс Восточно-Европейской платформы, вычисленный с учетом занижения наклона в осадочных породах // *Физика Земли*. 2018. № 1. С. 158–171. <https://doi.org/10.7868/S0002333718010131>
7. *Фетисова А.М., Веселовский Р.В., Арефьев М.П.* Новые палеомагнитные данные по пермо-триасовым осадочным разрезам Московской синеклизы // *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. Науки*. 2020. Т. 162. Кн. 2. С. 228–243. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.2.228-243>
8. *Фетисова А.М., Голубев В.К., Веселовский Р.В. и др.* Палеомагнетизм и магнитостратиграфия опорных пермо-триасовых разрезов центральной части Русской плиты: Жуков овраг, Слуккино и Окский съезд // *Геология и геофизика*. 2022. Т. 63. № 10. С. 1401–1419. <https://doi.org/10.15372/GiG2021157>
9. *Davydov V.I., Arefiev M.P., Golubev V.K., et al.* Radioisotopic and biostratigraphic constraints on the classical Middle–Upper Permian succession and tetrapod fauna of the Moscow syncline, Russia // *Geology*. 2020. V. 48. № 7. P. 742–747. <https://doi.org/10.1130/G47172.1>
10. *Голубев В.А., Арефьев М.П., Наумчева М.А. и др.* О возрасте пермских отложений нижнего течения р. Ветлуга, Нижегородская область // *Палеострат-2019. Годи́чное собрание (науч. конф.) секции палеонтологии МОИП и Моск. отд-ния Палеонтологического о-ва при РАН: Тез. докл. Ред. А.С. Алексеев, В.М. Назарова. М.: Палеонтол. ин-т им. А.А. Борисяка РАН. 2019. С. 21–22.*
11. *Голубев В.К., Фетисова А.М., Веселовский Р.В., Наумчева М.А.* Нижняя граница чансинского яруса (верхняя пермь) на Восточно-Европейской платформе // *Палеострат-2023. Годи́чное собрание (науч. конф.) секции палеонтологии МОИП и Моск. отд-ния Палеонтологического о-ва при РАН: Тез. докл. Ред. В.К. Голубев, В.М. Назарова – М.: Палеонтол. ин-т им. А.А. Борисяка РАН. 2023. С. 29–30.*
12. *Veselovskiy R.V., Dubinya N.V., Ponomarev A.V., et al.* Shared Research Facilities “Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism” of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022. 13 (2). 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>
13. *Tauxe L., Banerjee S.K., Butler R.F., et al.* Essentials of Paleomagnetism // 4th Web Edition. 2016.

14. *McFadden P.L., McElhinny M.W.* Classification of the reversal test in palaeomagnetism // *Geophys. J. Int.* 1990. V. 103, No 3. P. 725–729.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb05683.x>
15. *Фетисова А.М., Веселовский Р.В., Сиротин К.А. и др.* Палеомагнетизм и циклостратиграфия пограничного интервала перми-триаса разреза Старое Случино (Владимирская область) // *Физика Земли*. 2023. № 2. С. 162–175.
<https://doi.org/10.31857/S0002333723020060>
16. *Pavlov V.E., Fluteau F., Latyshev A.V., et al.* Geomagnetic secular variations at the Permian-Triassic boundary and pulsed magmatism during eruption of the Siberian Traps // *Geochem., Geophys., Geosyst.* 2019. V. 20. № 2. P. 773–791.
<https://doi.org/10.1029/2018GC007950>

NEW 254 ma PALEOMAGNETIC POLE OF THE EAST EUROPEAN PLATFORM: MOSCOW SYNECLISE, SUKHOBORKA AND SOSNOVKA SECTIONS

A. M. Fetisova^{a,b,#}, R. V. Veselovskiy^{a,b}, and V. K. Golybev^c

^a*Lomonosov Moscow State University, Geological faculty, Moscow, Russian Federation*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^c*Borissiak Paleontological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: anna-fetis@ya.ru*

Presented by Academician of the RAS L.I. Kogarko January 27, 2023

The paper presents the results of paleomagnetic and rock magnetic studied of upper Permian continental red beds of the Sukhoborka and Sosnovka sections of the south-eastern part of the Moscow syncline on the right bank of the Vetluga river in Nizhny Novgorod region, Russia. Arguments in favor of the primary nature of the characteristic component of magnetization are given. A first securely dated upper Permian (254 Ma) paleomagnetic pole of the east part of the East European Platform is calculated: $\text{slat} = 56.731^\circ\text{N}$, $\text{slong} = 45.748^\circ\text{E}$, $\text{N} = 44$, $\text{plat} = 55.3^\circ$, $\text{plong} = 158.1^\circ$, $\text{dp/dm} = 3.5^\circ/5.1^\circ$, $\text{paleolat} = 34.6^\circ$.

Keywords: paleomagnetism, East European Platform, Russian basin, Permian, paleomagnetic pole