ФИЗИКА ЗЕМЛИ, 2023, № 2, с. 162–175

УДК 550.384:[551.736.3+551.761.1](470)

ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ И ЦИКЛОСТРАТИГРАФИЯ ПОГРАНИЧНОГО ИНТЕРВАЛА ПЕРМИ–ТРИАСА РАЗРЕЗА СТАРОЕ СЛУКИНО (ВЛАДИМИРСКАЯ ОБЛАСТЬ)

© 2023 г. А. М. Фетисова[1, 2, *], Р. В. Веселовский[1, 2], К. А. Сиротин[1, 2], В. К. Голубев[3], Д. В. Рудько[2]

[1]МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва, Россия

[2]Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

[3]Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, г. Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 08.08.2022 г.
После доработки 29.10.2022 г.
Принята к публикации 30.10.2022 г.

Представлены результаты палеомагнитных, петромагнитных и циклостратиграфических исследований континентальных красноцветов, слагающих пограничный интервал перми–триаса разреза Старое Слукино во Владимирской области. По направлениям характеристических компонент естественной остаточной намагниченности изученных пород в опробованной толще выделены интервалы прямой и обратной полярности, отнесенные к региональным магнитозонам r_2RnP, r_3RnP и N_3P-T. Внутри зоны r_3RnP присутствует интервал аномальных палеомагнитных направлений, по своим характеристикам аналогичный выделенным ранее в одновозрастных интервалах разрезов Недуброво, Жуков овраг и Окский съезд. Пересмотр биостратиграфических определений допускает, что две зоны аномальных палеомагнитных направлений в сводной шкале магнитной полярности верхней перми Русской плиты являются отражением одной и той же эпохи аномальной конфигурации геомагнитного поля. Продолжительность накопления изученного 16-метрового интервала разреза Старое Слукино, оцененная с помощью циклостратиграфического метода, составляет 900 ± 20 тыс. лет, что ограничивает длительность аномального состояния геомагнитного поля вблизи границы перми и триаса в ~110000 лет. Вычислен новый пермо-триасовый (~252 млн лет) палеомагнитный полюс Восточно-Европейской платформы: plat = 36.3°; plong = 155.0°; dp/dm = 2.8°/4.8°.

Ключевые слова: палеомагнетизм, Восточно-Европейская платформа, Русская плита, пермь, триас, магнитостратиграфия, циклостратиграфия, палеомагнитный полюс.

DOI: 10.31857/S0002333723020060, **EDN:** LHXLZL

ВВЕДЕНИЕ

Стратиграфическая корреляция континентальных отложений нередко представляет собой сложную задачу, надежное решение которой требует комплексного подхода, в том числе при изучении каждого отдельно взятого обнажения горных пород. Отсутствие площадного осадконакопления и его прерывистый характер, многочисленные размывы и глубокие, до 10–15 м аллювиальные врезы – все это существенно усложняет выделение и корреляцию одновозрастных горизонтов не только в удаленных друг от друга, но и даже в близко расположенных разрезах. Широко используемый в целях стратиграфической корреляции терригенных толщ комплекс литологических и биостратиграфических методов не всегда приводит к однозначным результатам, поэтому часто одновременно с ним используются возможности палеомагнитологии – магнитостратиграфии и петромагнетизма. Палеомагнитный метод достаточно хорошо зарекомендовал себя при решении ряда стратиграфических задач, таких как (1) детальное расчленение толщ горных пород на основе их палео- и петромагнитных характеристик, (2) установление локальных и региональных маркирующих горизонтов в стратиграфической последовательности, (3) корреляция региональных и местных стратонов с общей стратиграфической шкалой [Молостовский, Храмов, 1997].

При изучении пород континентального генезиса стратиграфически полные разрезы с хорошими палеомагнитными характеристиками встречаются редко, поэтому надежность и полнота разрабатываемых региональных магнитостратиграфиче-

ских шкал во многом зависят не только от качества, но и от количества исследованных разрезов. В последние годы наш коллектив проводит комплексное изучение осадочных пород континентального происхождения в пограничном интервале перми и триаса разных районов Русской плиты Восточно-Европейской платформы [Фетисова и др., 2018а; 2018б; 2020; 2022]. Основными задачами исследований являются получение надежных палеомагнитных характеристик и корреляция разрезов с целью уточнения и детализации региональной магнитостратиграфической схемы пограничных отложений перми и триаса Восточно-Европейской платформы, ее сопоставления с одновозрастными морскими и континентальными отложениями Западной Европы и Азии, использования палеомагнитных данных для оценки основных характеристик магнитного поля Земли на границе палеозоя и мезозоя и уточнения палеотектонических реконструкций Евразии около 250 млн лет назад.

Обнаружение в геологической летописи интервалов аномальной конфигурации магнитного поля Земли в прошлом важно не только с точки зрения изучения его эволюции, но также дает возможность получить надежный магнитостратиграфический репер, который может быть использован в целях глобальной стратиграфической корреляции. К настоящему времени устойчивые аномальные палеомагнитные направления выявлены в породах разного возраста и происхождения [Храмов, 2007; Храмов, Иосифиди, 2012; Шацилло, Павлов, 2019], в том числе и в пограничных отложениях перми и триаса Русской плиты – разрезе Недуброво Вологодской области [Фетисова и др., 2018]. Недавно по результатам комплексных биостратиграфических и палеомагнитных исследований пермо-триасовых толщ в разрезах центральной части Русской плиты – Жуков овраг (Владимирская обл.), Слукино (Владимирская обл.) и Окский съезд (Нижегородская обл.) нами [Фетисова и др., 2022] было выдвинуто предположение о существовании двух близко расположенных интервалов аномальной конфигурации геомагнитного поля в позднепермское время, а также показано более сложное (дробное), чем это предполагается в работе [Hounslow, Balabanov, 2018], строение шкалы магнитной полярности для верхнепермского интервала. Тем не менее, доказательство существования выделенной в работе [Фетисова и др., 2022] региональной магнитной зоны r_3RnP, равно как и двух аномальных палеомагнитных зон a1r4 и a2r4 в магнитостратиграфической последовательности бассейна р. Ока, требуют привлечения новых палеомагнитных данных. В этой работе мы представляем результаты палеомагнитных исследований пограничных отложений перми и триаса разреза Старое Слукино (Владимирская область), проведенных в 2021–2022 гг., и их интерпретацию. Кроме того, впервые на примере пермо-триасовых толщ Русской плиты нами выполнена оценка продолжительности накопления исследованных отложений на основе циклостратиграфического анализа данных детальных измерений величины магнитной восприимчивости.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разрез Старое Слукино (56.19° N, 42.64° E) расположен в небольшом глубоком овраге, прорезающем правый берег р. Клязьма в д. Слукино (Владимирская обл.) в 1.25 км выше по течению от г. Гороховец (рис. 1). Пограничные отложения перми и триаса были вскрыты в трех канавах. Канавы №№ 1540(2167) и 1540(2168) заложены на правом борту оврага в 190 м ниже верховья оврага (автомобильная дорога в д. Слукино), располагаются в 10 м друг от друга. Вскрытый в них сводный разрез коренных отложений имеет мощность 13.3 м. Этот разрез изучался нами в 2015 г. Результаты его биостратиграфического исследования опубликованы в работах [Наумчева, Голубев, 2019; Наумчева, 2020; Naumcheva, Golubev, 2020]. В 2021 г. было уточнено строение разреза на уровне слоев 14–17, а также впервые изучена его верхняя часть мощностью 1.65 м – слои 37–41. В разрезе обнажена гороховецкая пачка обнорской свиты, представленная переслаиванием пестроцветных глин с прослоями полимиктовых песчаников и алевролитов, реже известняков. В отложениях обнаружены остатки многочисленных остракод, а также более редких гастропод, конхострак, рыб и корней растений. По остракодам вся толща относится к зоне *Wjatkellina fragiloides* – *Suchonella typica* верхневятского подъяруса верхней перми, ее нижняя часть (слои 1–29) соответствует слоям с *Suchonella clivosa* (нефедовский горизонт), а верхняя (слои 30–41) – слоям с *Suchonella rykovi* (жуковский горизонт) [Наумчева, Голубев, 2019; Наумчева, 2020; Naumcheva, Golubev, 2020].

Канава № 2169 располагается на правом борту оврага в 40 м выше по оврагу от канавы № 1540(2167). В ней вскрыта вохминская свита, представленная переслаиванием коричневых полимиктовых песчаников и красно-бурых глин и алевролитов с корнями растений (палеопочвы). В глинах обнаружены остракоды зоны *Darwinula mera* – *Gerdalia variabilis*, свидетельствующие о приуроченности слоев к вохминскому горизонту индского яруса нижнего триаса.

Разрезы № 1540(2167) и № 2169 перекрываются гипсометрически (по результатам барометрического нивелирования перекрытие составляет 2.5–2.8 м), но не перекрываются стратиграфически. Разрез № 2169 надстраивает разрез № 1540(2167) (рис. 1), однако величина стратиграфического

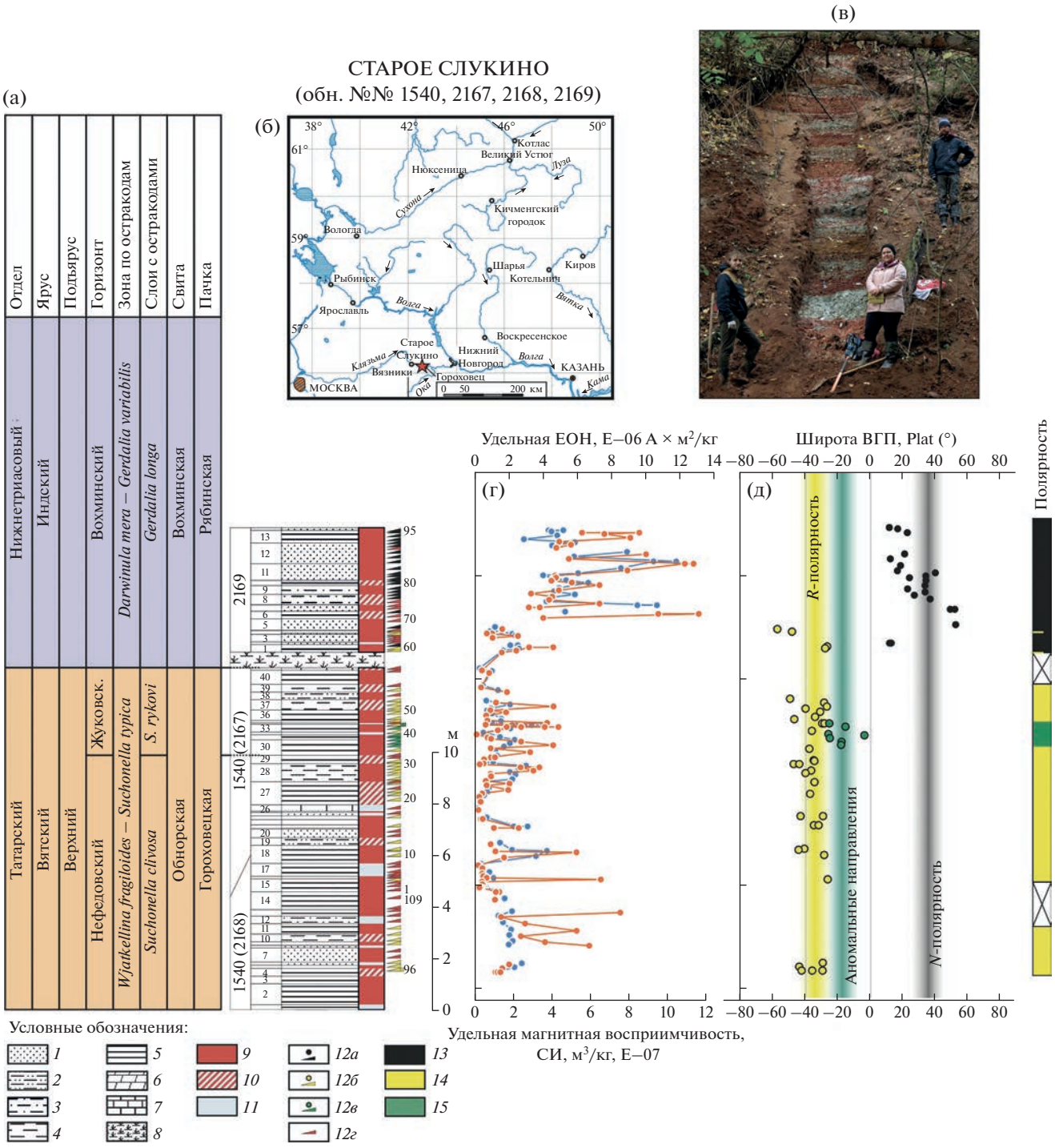

Рис. 1. Разрез Старое Слукино: (а) – стратиграфия, литология, схема опробования; (б) – место расположения на карте Восточной Европы; (в) – фотография обнажения № 1540(2167), слои 17–41, гороховецкая пачка обнорской свиты, нефедовский и жуковский горизонты, верхневятский подъярус, верхняя пермь; (г) – величина удельной естественной остаточной намагниченности (ЕОН – оранжевый цвет) и удельной магнитной восприимчивости (синий цвет); (д) – широта виртуального геомагнитного полюса (ВГП). Условные обозначения: *1* – песчаник; *2* – алевролит песчаный; *3* – алевролит; *4* – алевролит глинистый; *5* – глина; *6* – мергель; *7* – известняк; *8* – осыпь; *9* – красноцветы; *10* – пестроцветы; *11* – сероцветы; *12* – уровни отбора палеомагнитных образцов с характеристической компонентой ЕОН: прямой полярности – *а*, обратной полярности – б, с аномальной компонентой намагниченности – *в*, с шумной палеомагнитной записью – *г*; *13* – зоны прямой (N) полярности; *14* – зоны обратной (*R*) полярности; *15* – зона аномальных палеомагнитных направлений.

разрыва между ними нам не известна, так как граница жуковского и вохминского горизонтов в Старом Слукино не была вскрыта.

Разрез Старое Слукино по строению аналогичен пермо-триасовому красноцветному терригенному разрезу Жуков овраг, расположенному в 0.7 км южнее [Голубев и др., 2012; Наумчева, Голубев, 2019; Наумчева, 2020; Фетисова и др., 2022]. Многие слои, выделенные в разрезе Жуков овраг, распознаются в разрезе Старое Слукино. Это позволяет провести детальную литостратиграфическую корреляцию разрезов, которая подтверждается био- и магнитостратиграфическими данными (рис. 2). Однако в Старом Слукино не обнаружена (не вскрыта или отсутствует) жуковская пачка вохминской свиты, которая в разрезе Жуков овраг слагает терминальную часть жуковского горизонта. При этом в разрезе Старое Слукино жуковский горизонт представлен исключительно глинистыми отложениями. В нем отсутствуют песчаные отложения руслового аллювиального генезиса, которые присутствуют в жуковском горизонте в Жуковом овраге, а, следовательно, в нем нет бесспорных внутриформационных размывов и связанных с ними локальных стратиграфических перерывов. Это позволяет предположить, что в разрезе Старое Слукино жуковский горизонт стратиграфически более полон, чем в разрезе Жуков овраг.

ПЕТРОМАГНИТНЫЕ И ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика

Магнитостратиграфические исследования выполнялись с точной послойной привязкой каждого ориентированного штуфа к разрезу (рис. 1). Разрез опробован в трех канавах, общая мощность опробования составила 16 м; всего было отобрано 111 ориентированных штуфов, лабораторной обработке подверглось 113 образцов. Шаг опробования составлял от 2 до 20 см. Отбор штуфов производился вручную с помощью ножа из канав шириной 1 м и глубиной до 0.5 м, заложенных в склоне оврага; ориентировка штуфов производилась при помощи горного компаса; величина местного магнитного склонения рассчитана по модели IGRF (13-е поколение). Из каждого ориентированного штуфа выпиливалось 1–2 ориентированных палеомагнитных образца кубической формы с ребром 2 см. Все лабораторные исследования проводились согласно стандартной методике [Tauxe et al., 2018] в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН, ЦКП ИФЗ РАН [Veselovskiy et al., 2022] и Петромагнитной лаборатории МГУ имени М.В. Ломоносова. Измерения анизотропии магнитной восприимчивости (АМВ) производились на каппабридже KLY-4S (AGICO, Чехия) в поле 200 А/м, при интерпретации результатов использовалась программа Anisoft 4.2. Зависимость магнитной восприимчивости от температуры измерялась на каппабридже KLY-4S с использованием высокотемпературной приставки CS-4, обработка результатов выполнялась в программе Cureval8.

Все образцы были подвергнуты детальной температурной магнитной чистке, которая в большинстве случаев выполнялась до 680°С. Число шагов чистки составляло не менее 12, при необходимости детальность увеличивалась. Для размагничивания образцов использовалась немагнитная печь MMTD-80 (Magnetic Measurements, Англия) с величиной нескомпенсированного поля 5–10 нТл. Измерения остаточной намагниченности образцов проводились на спин-магнитометре JR-6 (AGICO, Чехия). Обработка измерений остаточной намагниченности выполнялась при помощи пакета программ Энкина [Enkin, 1994] и PMTools (Ефремов И.В.), использующих при выделении компонент намагниченности метод PCA [Kirschvink, 1980]. В полевых условиях по всему разрезу с шагом 5 см портативным каппаметром ПИМВ (ООО “Геодевайс”, Россия) с чувствительностью до 1×10^{-7} ед. СИ были произведены замеры значений магнитной восприимчивости.

Петромагнетизм

Для всех исследованных образцов были вычислены скалярные магнитные параметры. Удельная естественная остаточная намагниченность в изученных породах имеет значения в диапазоне от 8.19E–08 до 1.31E–05 А м^2/кг в среднем составляя 2.99E–06 А м^2/кг. Минимальное значение удельной магнитной восприимчивости составляет 1.58E–07 ед. СИ м^3/кг, максимальное – 1.04E–06 ед. СИ м^3/кг, среднее значение – 2.29E–07 ед. СИ м^3/кг. На графике распределения значений удельной естественной остаточной намагниченности и удельной магнитной восприимчивости по мощности разреза отчетливо видно (рис. 1г), что на границе перми и триаса происходит резкое увеличение значений: скалярные параметры в породах рябинской пачки значительно выше, чем в гороховецкой. Фактор Кенигсбергера (Q) в среднем по разрезу составляет 0.26, имея минимальные значения 0.04 и максимальное 1.5. Значение фактора Q, преимущественно, меньше 1, что, в целом, ожидаемо для осадочных пород. Подобное поведение скалярных магнитных параметров наблюдалось в разрезах Жуков овраг, Слукино, Окский съезд и связывается с увеличением сноса материала с Ураль-

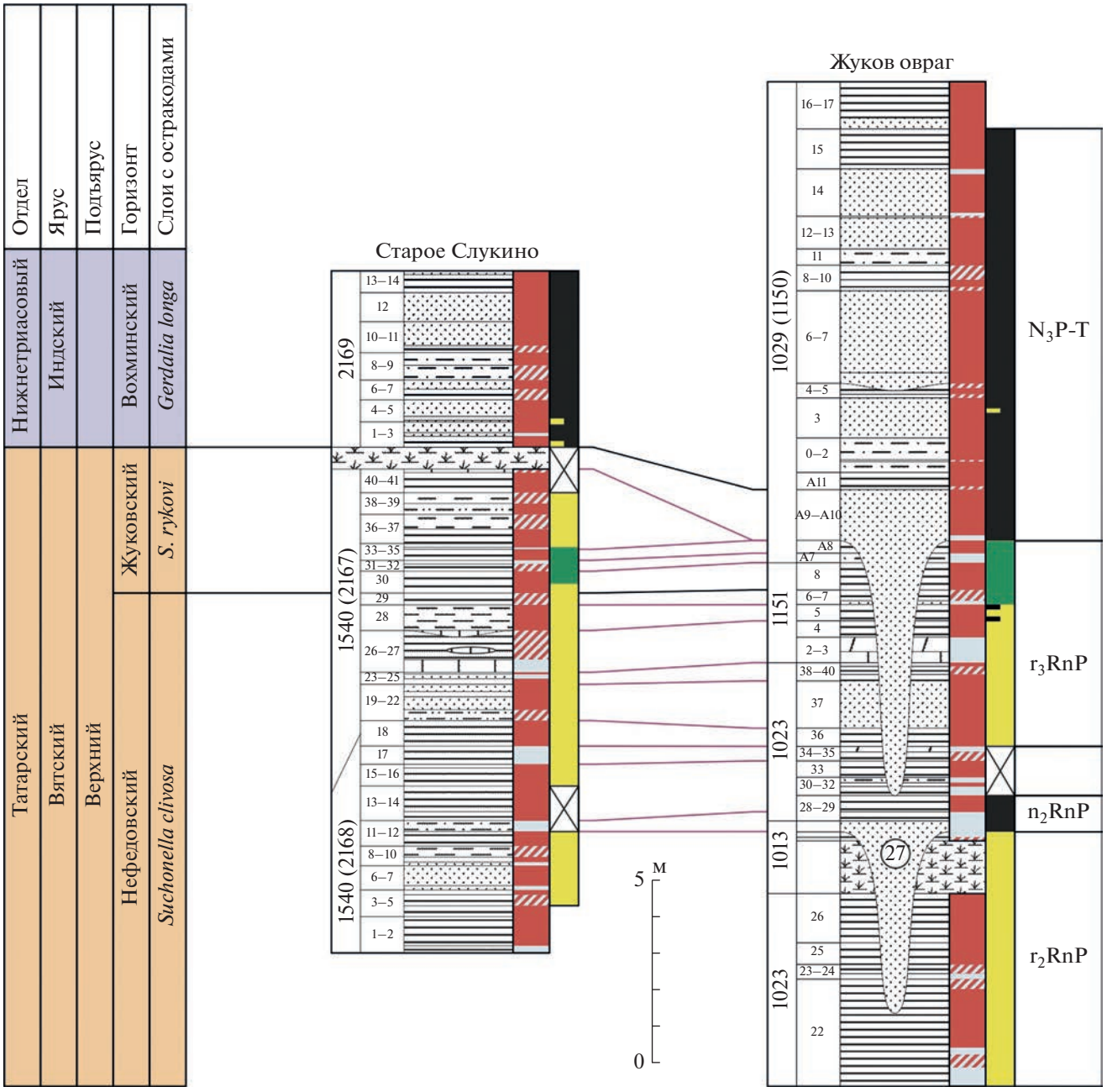

Рис. 2. Схема корреляции разрезов Старое Слукино и Жуков овраг (условные обозначения см. на рис. 1).

ского орогена, испытавшего в начале триаса воздымание [Граница..., 1998].

Анизотропия магнитной восприимчивости была измерена для всех образцов с целью выяснения магнитной текстуры и условий осадконакопления, а также для дополнительного контроля за ориентировкой образцов при отборе и пробоподготовке. Степень анизотропии не превышает 11%, в среднем составляя 4%. Форма эллипсоида магнитной восприимчивости, за исключением четырех образцов, уплощенная (рис. 3). Минимальные оси (K3) эллипсоида AMB достаточно кучно группируются в вертикальной плоскости, а максимальные (K1) и промежуточные (K2) равномерно распределены в плоскости напластования, что типично для осадочных пород, формировавшихся в спокойных гидродинамических условиях. Отметим, что характер распределения главных осей эллипсоида AMB в образцах не меняется по мощности разреза и не зависит от со-

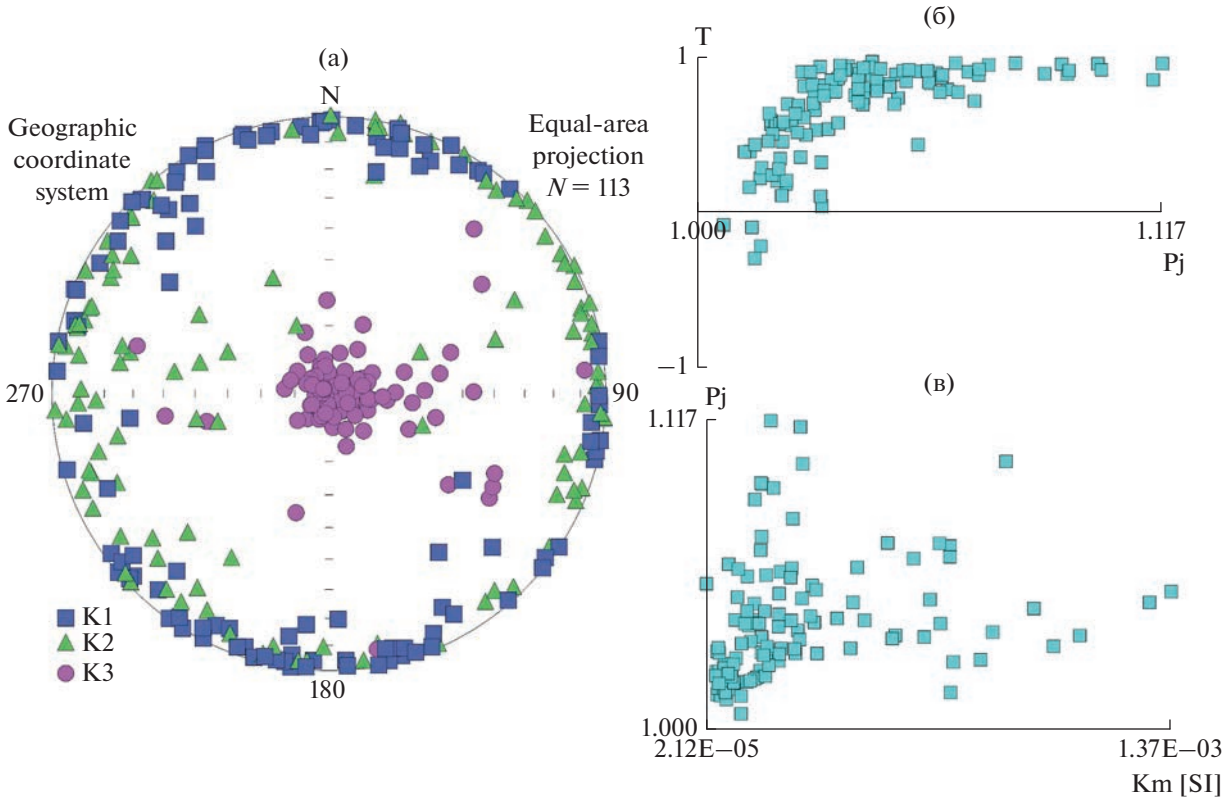

Рис. 3. Анизотропия магнитной восприимчивости (АМВ) в породах разреза Старое Слукино: (а) – стереограмма с распределением осей эллипсоида АМВ (K1 – максимальная ось, K2 – промежуточная ось, K3 – минимальная ось); (б) – зависимость параметра формы (T) от степени анизотропии (Pj); (в) – зависимость значений магнитной восприимчивости (Km) от степени анизотропии (Pj).

става пород, а равномерное распределение свидетельствует о первичности магнитной текстуры.

Сведения о магнитной минералогии пород были получены при изучении температурной зависимости магнитной восприимчивости $k(T)$ для шести наиболее представительных образцов: производился один нагрев до 700°C при атмосферном давлении в воздушной среде с последующим охлаждением. Для четырех образцов кривая нагрева подобна кривой охлаждения, что говорит об отсутствии существенных минеральных преобразований в ходе нагрева (рис. 4, обр. 99), а небольшой перегиб, который отмечается при 550°C, свидетельствует о присутствии в породах магнетита, возможно, с низким содержанием титана. В образце № 55 (рис. 4) кривая нагрева находится существенно ниже кривой охлаждения. На кривой охлаждения отмечается резкий рост намагниченности на 540°C и прогиб кривой на 380°C, что может указывать на образование в ходе эксперимента сульфидов. Для образца № 90 (рис. 4) кривая нагрева расположена значительно выше кривой охлаждения, что характерно для перехода магнетита в гематит при нагреве в воздухе.

Палеомагнетизм

В составе естественной остаточной намагниченности (ЕОН) пород выделяется, как правило, две компоненты намагниченности, качество палеомагнитной записи сильно варьирует от образца к образцу. Для 45% образцов возможно уверенное выделение характеристической компоненты намагниченности (ChRM) и вычисление ее направления, а палеомагнитная запись 55% образцов позволяет лишь определить полярность ChRM, но ее направление вычисляется со значением MAD более 8°; такие образцы не использовались для вычисления среднего палеомагнитного направления. Низкотемпературная компонента естественной остаточной намагниченности разрушается в интервале температур до 180°C и имеет, скорее всего, вязкую природу (рис. 5а–5в). Характеристическая компонента разрушается в диапазоне 400–680°C и имеет в породах гороховецкой пачки обратную (R) полярность (рис. 5б), а в породах рябинской пачки – прямую (N) полярность (рис. 5а). В породах гороховецкой пачки встречаются образцы, имеющие аномальное направление ChRM, для которого характерно низ-

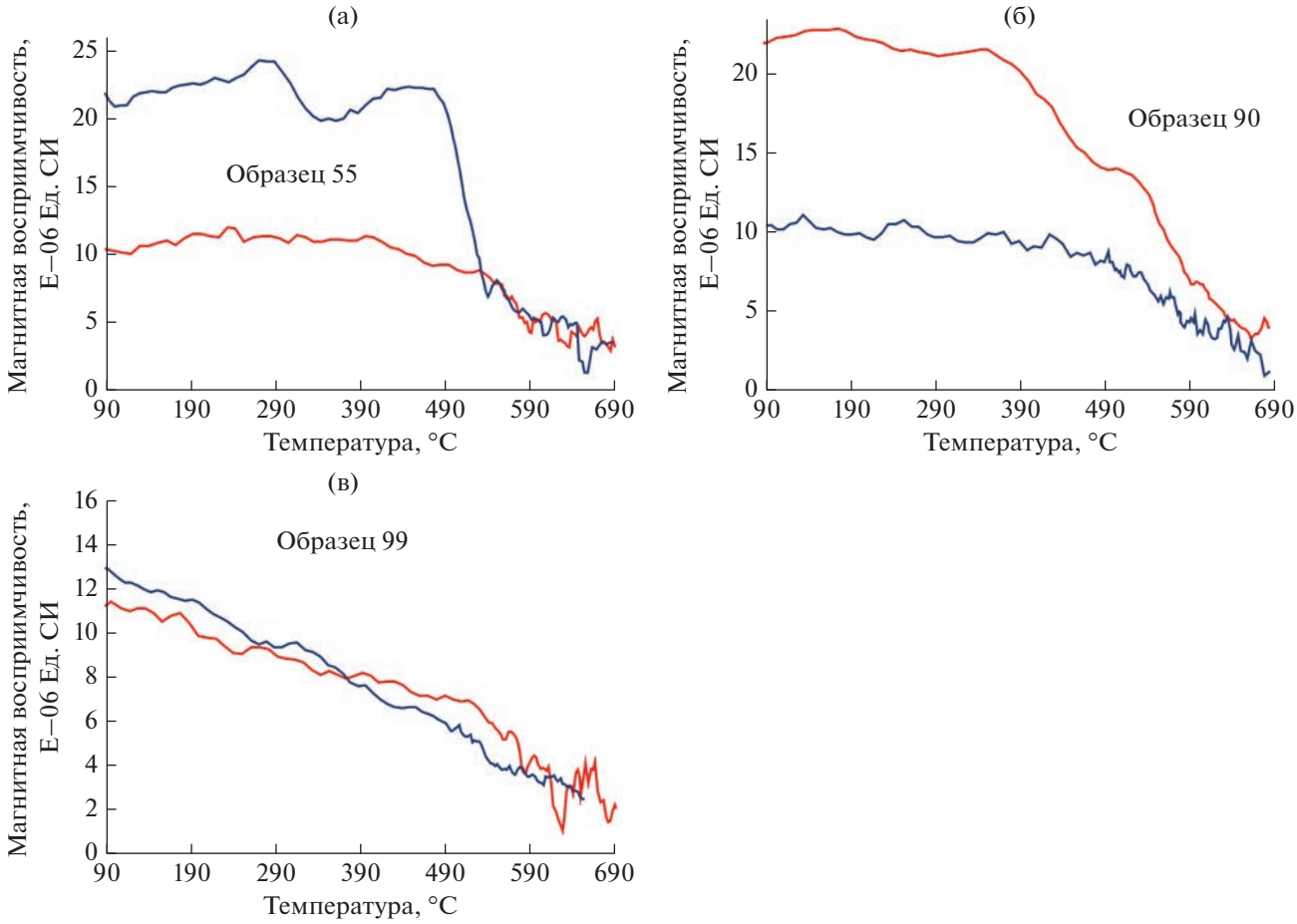

Рис. 4. Температурная зависимость магнитной восприимчивости при нагреве (красная кривая) и охлаждении (синяя кривая) трёх наиболее типичных образцов.

кое наклонение (около 0°) и склонения в интервале 210–270° (рис. 5в). Распределение направлений ChRM в образцах характеризуется большим разбросом, поэтому для вычисления средних палеомагнитных направлений прямой и обратной полярности (рис. 5г) был использован критерий отсечения “cutoff 45°”. Среднее палеомагнитное направление, вычисленное с учетом наиболее стабильных компонент намагниченности обеих полярностей, составляет N = 49, D = 51.9°, I = = 34.2°, K = 24.5, a95 = 4.2° (рис. 5г). Тест обращения [McFadden, McElhinny, 1990] для средних направлений ChRM прямой и обратной полярности отрицательный (γ/γ_{cr} = 10.3°/8.6°). Доводами в пользу первичности выделенных компонент служит: 1) наличие в породах одного разреза компонент прямой и обратной полярности; 2) близость полученного среднего палеомагнитного направления к ожидаемому пермо-триасовому [Фетисова и др., 2018б]. Соответствующий вычисленному среднему палеомагнитному направлению палеомагнитный полюс имеет координаты *plat* = 36.3°, *plong* = 155.0°, dp/dm = 2.8°/4.8°, палеоширота разреза Старое Слукино составляет 18.8° с.ш. Оценка коэффициента занижения наклонения не проводилась в виду малого объема выборки единичных палеомагнитных направлений ChRM.

МАГНИТОСТРАТИГРАФИЯ

С использованием единичных направлений характеристической компоненты намагниченности в изученных образцах были вычислены координаты виртуальных геомагнитных полюсов (ВГП). Выделение в разрезе интервалов магнитной полярности производилось на основании значения широты ВГП *Plat* (рис. 1д) и только в том случае, когда магнитозона подтверждена данными по не менее чем двум образцам (штуфам).

В верхней части разреза, по совокупности био- и магнитостратиграфических данных, уверенно выделяется магнитозона N_3P-T. Нижняя часть разреза, отвечающая гороховецкой пачке, соотносится с субзонами обратной магнитной полярности r_2RnP и r_3RnP (рис. 1, рис. 2). В верхней части субзоны r_3RnP, в основании жуковского горизонта

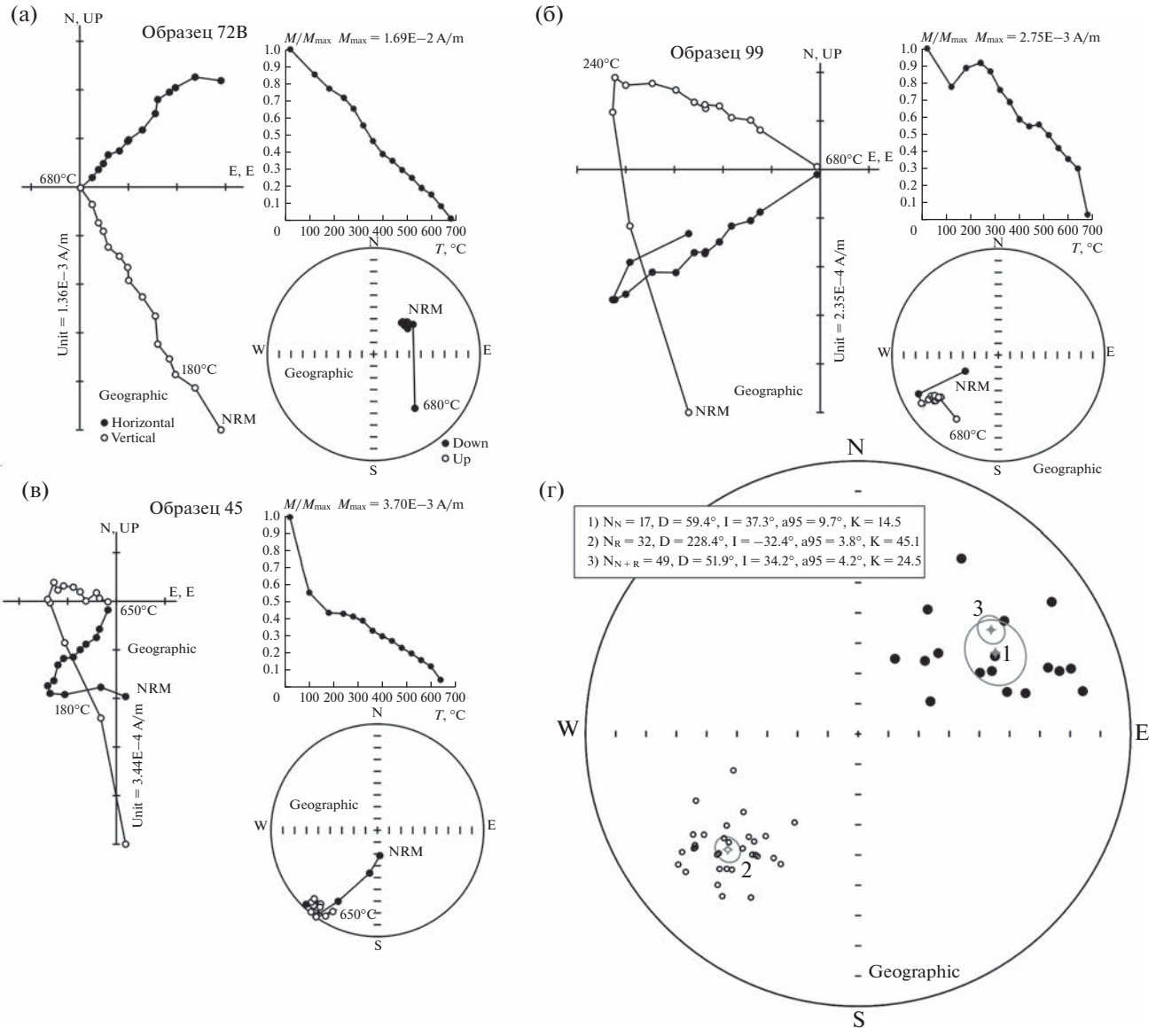

Рис. 5. Стереограммы, кривые размагничивания и диаграммы Зийдервельда, иллюстрирующие процесс ступенчатой температурной магнитной чистки образцов. Географическая (современная) система координат: (а) – пример образца с ChRM прямой полярности; (б) – пример образца с ChRM обратной полярности; (в) – пример образца с аномальным направлением ChRM; (г) – распределение единичных направлений характеристической компоненты намагниченности (ChRM) и средние направления компонент прямой (№ 1), обратной (№ 2), а также прямой и обращенной обратной (№ 3) полярности с кругами 95%-го доверия.

обнаружен интервал с аномальной палеомагнитной записью, характеризующийся низкими значениями широты ВГП. Подобный интервал был ранее выделен в нескольких разрезах Восточно-Европейской платформы – Недуброво, Жуков овраг, Окский съезд [Фетисова и др., 2018а; 2022]. Важно отметить, что в близлежащем разрезе Жуков овраг этот интервал непосредственно перекрывается русловыми аллювиальными отложениями жуковской пачки, которые залегают с эрозионным несогласием на подстилающих породах гороховецкой пачки. Русловые отложения жуковской пачки слагают терминальную часть жуковского горизонта и принадлежат ортозоне N_3P-T (рис. 2). Таким образом, в разрезе Жуков овраг интервал с аномальными палеомагнитными направлениями находится на границе интервалов прямой и обратной полярности – магнитозон r_3RnP и N_3P-T. В разрезе Старое Слукино аналогичный интервал с аномальной палеомагнитной записью расположен внутри субзоны r_3RnP. Учитывая возможность проследить слои между двумя разрезами (рис. 2), нами было установлено, что в

разрезе Жуков овраг отложения, отвечающие зоне обратной полярности выше аномального интервала, были либо недостаточно изучены, либо срезаны жуковской пачкой. Таким образом, новые полученные нами в этой работе данные уточняют стратиграфическое положение аномальной зоны (рис. 6). Заметим, что аналогичное положение аномальной палеомагнитной зоны внутри интервала обратной полярности наблюдается в разрезе Недуброво.

При внимательном рассмотрении рис. 1д обращает на себя внимание интервал разреза, отвечающий рябинской пачке нижнего триаса, для которого получены аномально низкие значения широт ВГП, расположенных в северном полушарии. Мы полагаем, что эти данные не свидетельствуют об аномальной конфигурации геомагнитного поля в момент накопления пород, так как они не находят подтверждения по результатам изучения соответствующих интервалов других разрезов – Жуков овраг, Слукино, Окский съезд [Фетисова и др., 2022]. Возможно, что причина заниженных наклонений характеристической компоненты намагниченности, равно как и весьма посредственного качества палеомагнитной записи в красноцветах рябинской пачки связана с гранулометрическим составом пород. Действительно, интервал низких северных широт ВГП приходится на пачку песчаников, в то время как образцы алевролитов несут характеристическую компоненту намагниченности ожидаемого направления.

Интересная ситуация с положением интервала аномальной палеомагнитной записи сложилась в разрезе Окский съезд. Здесь аномальная магнитозона была установлена нами [Фетисова и др., 2022] также внутри интервала обратной полярности r_3RnP. Однако по биостратиграфическим данным было сделано заключение, что она располагается ниже аномального интервала разреза Жуков овраг – не в жуковском, а в нефедовском горизонте. Таким образом, в сводном магнитостратиграфическом разрезе верхневятского подъяруса бассейна р. Ока присутствовало две одинаковых по своим характеристикам зоны аномальных палеомагнитных направлений [Фетисова и др., 2022]. Поскольку последнее крайне маловероятно, нами был проведен повторный анализ биостратиграфических данных по разрезу Окский съезд, результаты которого приведены ниже.

В разрезе Окский съезд, в магнитозоне r_3RnP выше интервала с аномальными палеомагнитными направлениями, обнаружены остатки тетрапод (местонахождение Лагерный Овраг-2) и остракод. Эти находки свидетельствовали о нефедовском возрасте вмещающих отложений [Голубев и др., 2012; Наумчева, Голубев, 2019; Наумчева, 2020]. Дожуковский возраст местонахождения тетрапод не вызывает сомнений, так как здесь найден клык *Inostranzevia* sp. Этот род характерен только для тетраподной комплексной зоны *Scutosaurus karpinskii* [Сенников, Голубев, 2017], верхняя граница которой совпадает с границей нефедовского и жуковского горизонтов [Бояринова, и др., 2022]. Остатки тетрапод были обнаружены в слое песчаника видимой мощностью более 2 м, который был временно обнажен в процессе дорожно-строительных работ в 2011 г. на левом склоне северного отвержка Лагерного оврага, обнажение № 1102 (правый берег р. Ока в г. Нижний Новгород). Палеомагнитные штуфы отбирались из разреза № 1135J, который располагался на правом борту того же отвержка, в 60 м запад-северо-западнее местонахождения Лагерный Овраг-2. Отсутствие непрерывного обнажения коренных пород между этими разрезами не позволило осуществить их литостратиграфическую корреляцию во время полевых исследований. Положение костеносного песчаника в разрезе № 1135J тогда было определено барометрическим нивелированием с помощью барометра, встроенного в GPS-приемник Garmin GPSmap 76CSx. На гипсометрическом уровне, соответствующем уровню костеносного песчаника, здесь в интервале 2.5 м присутствуют четыре песчаных слоя мощностью от 0.1 до 0.3 м. Один из этих слоев (слой 11) располагается ниже интервала с аномальными палеомагнитными направлениями, один слой (слой 9) – внутри интервала и два слоя (слои 5 и 7) – выше него. Аналогом костеносного песчаника был признан самый верхний из этих песчаных слоев. Однако, учитывая невысокую точность проведенного барометрического нивелирования и возможное негоризонтальное залегание отложений, любой из этих слоев может оказаться аналогом костеносного песчаника. Более того, костеносный песчаник может выклиниваться, и тогда в разрезе № 1135J его аналога нет. Таким образом, стратиграфическое положение местонахождения тетрапод Лагерный Овраг-2 относительно слоев с аномальной палеомагнитной записью следует признать неопределенным.

Остракоды были обнаружены в том же обнажении, в котором отбирались палеомагнитные штуфы. Глина с остракодами (слой 1105/9 [Наумчева, Голубев, 2019; Наумчева, 2020]) располагается в 1.3 м выше аномального интервала, в толще отложений с обратной полярностью. Комплекс остракод представлен *Volganella truncata, Suchonella circula, S. aff. auriculata, Wjatkellina verbitskajae и Suchonellina compacta* [Наумчева, 2020]. За исключением *S. aff. auriculata* все таксоны характерны как для нефедовского (слои с *Suchonella clivosa*), так и для жуковского (слои с *Suchonella rykovi*) горизонта [Наумчева, Голубев, 2019; Наумчева, 2020]. *S. aff. auriculata* на территории Московской синеклизы встречена в трех разрезах: Аристово

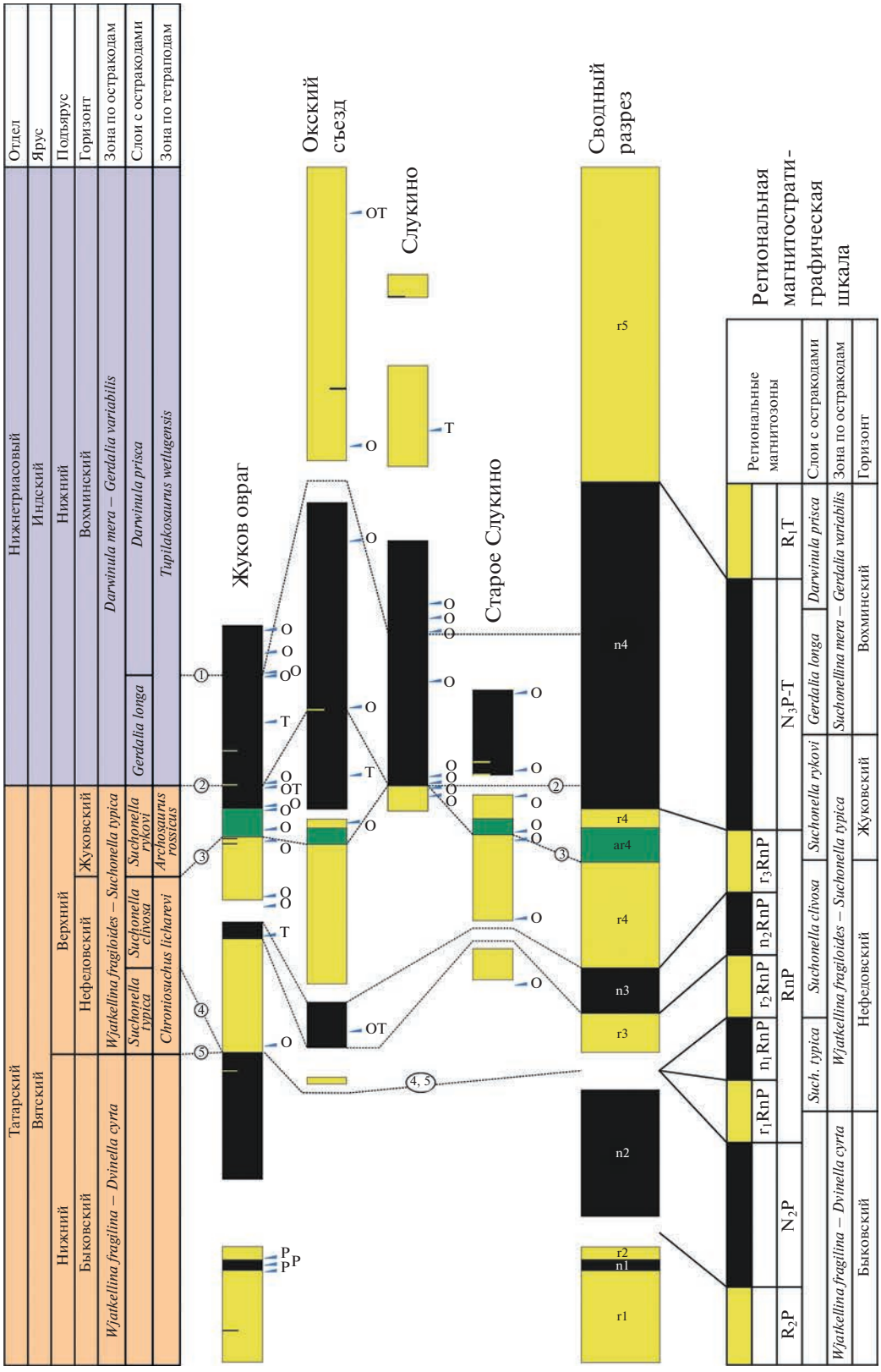

Рис. 6. Корреляция палеомагнитных разрезов пограничных отложений перми и триаса бассейна р. Ока, сводная палеомагнитная колонка и региональная магнитостратиграфическая шкала с индексами магнитных зон. Уровни находок стратиграфически значимых ископаемых остатков: О – остракоды, Т – тетраподы, Р – рыбы. Корреляционные уровни – нижние границы: 1 – слоев с *Darwinula prisca*; 2 – слоев с *Gerdalia longa* (вохминского горизонта); 3 – слоев с *Suchonella rykovi* (жуковского горизонта); 4 – слоев с *Suchonella clivosa*; 5 – слоев с *Suchonella typica* (нефедовского горизонта и верхневятского подъяруса). Условные обозначения см. на рис. 1.

(Вологодская обл.), Слукино и Старое Слукино. В данных разрезах она действительно распространена только в нефедовском горизонте [Наумчева, 2020]. Однако имеющихся стратиграфических данных по этой необычной форме остракод явно недостаточно чтобы уверенно диагностировать нефедовский горизонт по присутствию только одного этого таксона.

Таким образом, актуальные биостратиграфические данные не позволяют установить точный возраст слоев с аномальными палеомагнитными направлениями в разрезе Окский съезд. Эти слои могут соответствовать как нефедовскому, так и жуковскому горизонту. Исходя из вышесказанного, мы признаем присутствие в сводном магнитостратиграфическом разрезе верхневятских отложений Окского бассейна только одного аномального интервала ar4 (рис. 6). Этот интервал располагается внутри субзоны r_3RnP в основании жуковского горизонта.

ЦИКЛОСТРАТИГРАФИЯ

Методика

В основе циклостратиграфического подхода к оценке продолжительности накопления разрезов осадочных горных пород лежит цикличность климата как следствие изменения параметров земной орбиты известной длительности – циклов Миланковича. Величина магнитной восприимчивости (МВ), которая находится в зависимости от климатических условий во время осадконакопления, дает возможность выделения циклов Миланковича посредством методов спектрального анализа. Количество выявленных циклов различного порядка определяет продолжительность формирования осадочной толщи.

Измерения магнитной восприимчивости для циклостратиграфических исследований проводились на естественном обнажении портативным каппаметром с шагом ~5 см, ошибка позиционирования каппаметра оценивается в ±1 см. Следует отметить, что магнитная восприимчивость также измерялась в лабораторных условиях для всех отобранных на палеомагнитные исследования образцов, и сравнение ее величин, полученных двумя различными методами измерений, показало отличную сходимость результатов.

Основы используемого нами подхода подробным образом изложены в работе [Kodama, Hinnov, 2014], и мы строго следуем всем его этапам. Первым этапом циклостратиграфического анализа разреза Старое Слукино является оценка влияния ошибки положения точки измерения на конечный результат. Для этого нами было сгенерировано 10 случайных наборов интервалов замеров величины магнитной восприимчивости исходя из ее нормального распределения со следующими

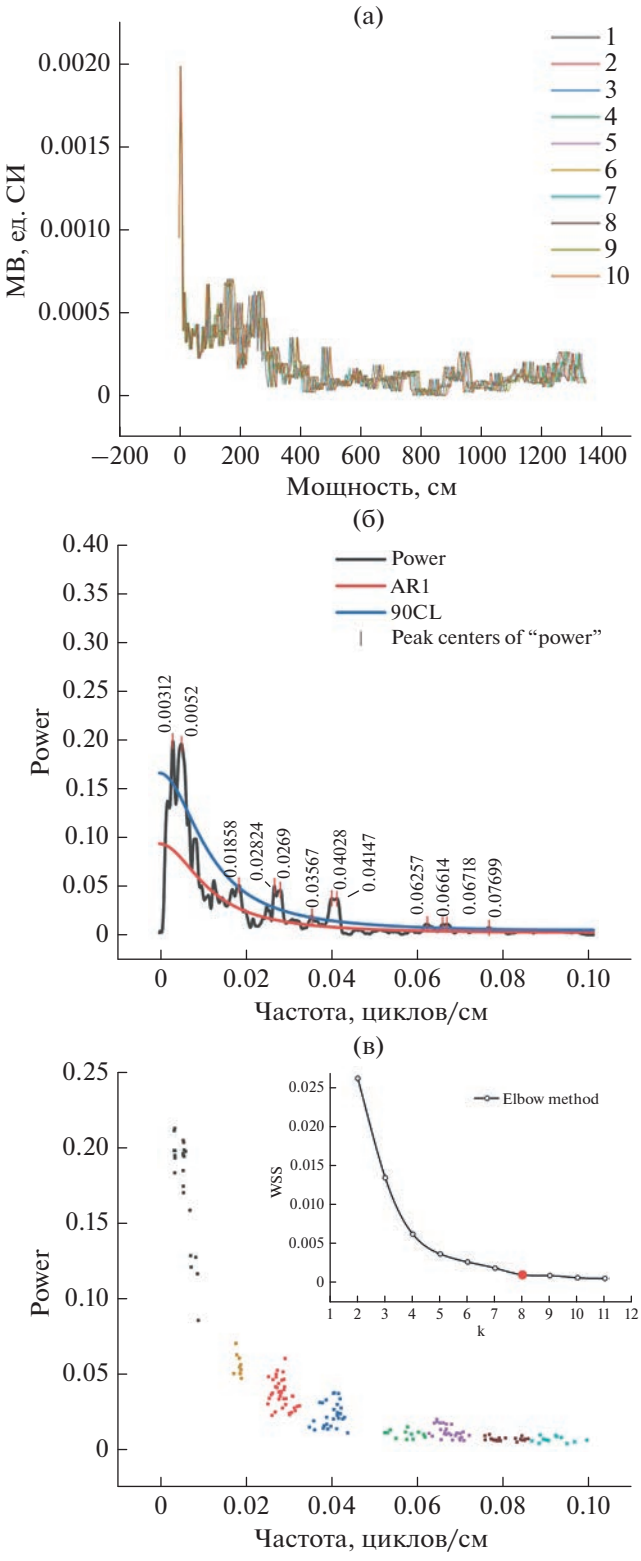

Рис. 7. Результаты циклостратиграфических исследований: (а) – 10 генераций отбора образцов с шагом из нормального распределения с параметрами среднее = 5, стандартное отклонение = 1; (б) – пример периодограммы для вариаций МВ с уровнем красного шума и доверительным уровнем 90%; (в) – кластеры пиков (разными цветами) на периодограммах вариаций МВ.

Сопоставление выявленных периодов циклам Миланковича

Периоды в вариациях магнитной восприимчивости					La04 [Laskar et al., 2004]	
№	частота	период (см)	отношение	рассчитанная продолжительность (тыс. лет)	отношение циклов Миланковича	продолжительность циклов Миланковича (тыс. лет)
1	0.0053	187.97	1.00	124.00	1.00	125
2	0.0182	54.85	3.43	36.19	3.44	36.3
3	0.0282	35.41	5.31	23.36	5.68	22
					5.98	20.9
4	0.0398	25.11	7.48	16.57	6.98	17.9
5	0.0572	17.49	10.74	11.54		
6	0.0672	14.87	12.64	9.81		
7	0.0803	12.46	15.09	8.22		
8	0.0918	10.90	17.25	7.19		

параметрами: среднее значение – 5, стандартное отклонение – 1 (рис. 7а). Для каждой получившейся кривой виртуально были выполнены замеры МВ с равным шагом 5 см, после чего из кривой был вычтен длиннопериодный тренд, построенный по методу LOESS (локализованная полиномиальная регрессия) с окном равным 66% длины последовательности. Эта процедура дает возможность удалить из спектрограммы пики, отвечающие возможным длинам периодов, повторяющихся в сигнале менее 2 раз. После вычитания тренда каждая кривая была подвергнута процедуре спектрального анализа по методу MTM [Thomson, 1982], который позволяет получить осредненную оценку спектральной плотности путем применения к временному ряду набора весовых функций, представленных ортогональными сфероидными функциями [Slepian, Pollak, 1961]. Для оценки достоверности выделенных периодов тестировалась нулевая гипотеза о том, что весь сигнал является красным шумом. Под красным шумом понимается случайный процесс, обладающий некоторой “памятью” – каждое наблюдение в нем имеет положительную корреляцию с предыдущим. Спектр мощности такого процесса имеет повышенную плотность в области низких частот, что и отражено в названии шума словом “красный”. Именно такие процессы описывают многие климатические флуктуации на больших масштабах времени [Hasselman, 1976]. На периодограммы нанесен средний спектр красного шума и уровни доверия (CL), отвечающие различным вероятностям отличия от нулевой гипотезы. Для всех периодограмм пики, находящиеся выше 90% (рис. 7б), объединены в кластеры по методу *K*-средних; значение *K* определено по методу “локтя” и равно 8 (рис. 7в). Спектральный анализ выполнен с использованием программного обеспечения Acycle v.2.4 [Li et al., 2019].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Средние значения длин периодов для выявленных кластеров частот пиков на периодограммах составляют: (1) 187.8 см; (2) 54.9 см; (3) 35.4 см; (4) 25.1 см; (5) 17.5 см; (6) 14.9 см; (7) 12.5 см; (8) 10.9 см (табл. 1). При этом кластеры для частот выше 0.05 (кластеры 4–8) не могут быть однозначно разделены: для разных вариантов кривых магнитной восприимчивости положения пиков сильно отличаются, что указывает на их сильную подверженность ошибке определения положения измерения в разрезе, поэтому они были исключены из рассмотрения. Первые четыре кластера отвечают периодам с отношениями длин 1.00/3.43/5.31/7.48 (таблица). Согласно модели La04 [Laskar et al., 2004] продолжительность циклов Миланковича для возраста 250 млн лет составляет 125.0 тыс. лет; 95.0 тыс. лет (эксцентриситет), 36.3 тыс. лет (наклон оси вращения Земли к эклиптике), 22.0 тыс. лет; 20.9 тыс. лет; 17.9 тыс. лет (прецессия), а отношения их длин близки к таковым для выявленных нами периодов. Таким образом можно однозначно сопоставить кластер 1 циклам эксцентриситета, кластер 2 – циклам наклона оси вращения Земли, а кластеры 3 и 4 – циклам прецессии. Это позволяет рассчитать длительность накопления опробованного интервала разреза как 900 ± 20 тыс. лет.

Важно отметить, что поскольку мощность интервала с аномальными палеомагнитными направлениями в основании жуковского горизонта составляет около 2 м, то полученная выше оценка продолжительности накопления всего 16-метрового разреза позволяет оценить длительность

аномального состояния геомагнитного поля в поздней перми примерно в 110 тыс. лет, что согласуется с независимой оценкой продолжительности этого интервала в разрезе Недуброво [Фетисова и др., 2018].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили впервые получить петромагнитные и палеомагнитные характеристики пограничных отложений перми и триаса разреза Старое Слукино, на основе которых для этого разреза составлена шкала магнитной полярности и выполнена ее корреляция с разрезами перми и триаса центральных районов Русской плиты и региональной магнитостратиграфической шкалой. Основные конкретные результаты представленной работы следующие:

1) Уточнено строение и положение субзоны обратной полярности r_3RnP. Внутри субзоны в основании жуковского горизонта расположен один интервал аномальных палеомагнитных направлений, выше которого породы средней части жуковского горизонта намагничены в эпоху обратной полярности.

2) Продолжительность накопления 16-метровой опробованной части разреза Старое Слукино оценена циклостратиграфическим методом в 900 ± 20 тыс. лет, а длительность интервала аномального состояния геомагнитного поля – в 110 тыс. лет.

3) Вычислен новый пермо-триасовый палеомагнитный полюс Восточно-Европейской платформы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Т.Э. Багдасарян и И.Е. Лебедеву за неоценимую помощь при проведении полевых исследований, а также двум рецензентам, чьи замечания позволили существенно улучшить качество данной работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Палеомагнитные и циклостратиграфические исследования проведены при поддержке гранта РНФ № 22-27-00597. Лабораторные исследования выполнялись на оборудовании ЦКП “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бояринова Е.И., Голубев В.К., Буланов В.В. Хронология местонахождений посткраниальных остеодерм позднепермских парейазавров Восточной Европы. Палеонтология и стратиграфия: современное состояние и пути развития. Материалы 68 сессии Палеонтологического общества при РАН, посвященной 100-летию со дня рождения Александра Ивановича Жамойды / Розанов А.Ю., Петров О.В. (ред.). СПб.: ВСЕГЕИ. 2022. С. 196–198.

Голубев В.К., Миних А.В., Балабанов Ю.П., Кухтинов Д.А., Сенников А.Г., Миних М.Г. Опорный разрез перми и триаса в Жуковом овраге у г. Гороховец, Владимирская область // Бюллетень Региональной межведомственной стратиграфической комиссии по Центру и Югу Русской платформы. 2012. Вып. 5. С. 49–82.

Голубев В.К., Сенников А.Г., Миних А.В., Карасев Е.В. Палеонтологическая характеристика пермо-триасовых отложений в Нижнем Новгороде. Палеострат-2012. Годичное собрание (научная конференция) секции палеонтологии МОИП и Московского отделения Палеонтологического общества при РАН (Москва, 30 января–1 февраля 2012 г.). Программа и тезисы докладов / Алексеев А.С. (ред.). М.: Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН. 2012. С. 23–25.

Граница перми и триаса в континентальных сериях Восточной Европы. Материалы к Международному симпозиуму “Верхнепермские стратотипы Поволжья”. М.: ГЕОС. 1998. 246 с.

Молостовский Э.А., Храмов А.Н. Магнитостратиграфия и ее значение в геологии. Саратов: изд-во Саратов. Ун-та. 1997. 180 с.

Наумчева М.А., Голубев В.К. Комплексы остракод пограничных отложений перми и триаса Московской синеклизы // Региональная геология и металлогения. 2019. № 80. С. 21–29.

Наумчева М.А. Остракоды и биостратиграфия пограничных отложений перми и триаса центральных районов Русской плиты. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2020. 264 с.

Сенников А.Г., Голубев В.К. Последовательность пермских фаун тетрапод Восточной Европы и пермо-триасовый экологический кризис // Палеонтологический журнал. 2017. № 6. С. 30–41.
https://doi.org/10.7868/S0031031X17060022

Фетисова А.М., Балабанов Ю.П., Веселовский Р.В., Мамонтов Д.А. Аномальная намагниченность красноцветов недубровской пачки пограничных пермо-триасовых отложений Русской плиты // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018а. Т. 63. № 4. С. 544–560.
https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.409

Фетисова А.М., Веселовский Р.В., Scholze F., Балабанов Ю.П. Новый пермо-триасовый палеомагнитный полюс Восточно-Европейской платформы, вычисленный с учетом занижения наклонения в осадочных породах // Физика Земли. 2018б. № 1. С. 158–171.

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.

Фетисова А.М., Голубев В.К., Веселовский Р.В., Балабанов Ю.П. Палеомагнетизм и магнитостратиграфия опорных пермско-триасовых разрезов центральной части Русской плиты: Жуков овраг, Слукино и Окский съезд // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 10. С. 1401–1419.
https://doi.org/10.15372/GiG2021157

Храмов А.Н. Геомагнитные инверсии в палеозое: переходное поле, полярная асимметрия и мантийная конвекция // Физика Земли. 2007. № 10. С. 4–14.

Храмов А.Н., Иосифиди А.Г. Асимметрия геомагнитной полярности: экваториальный диполь, Пангея и земное ядро // Физика Земли. 2012. № 1. С. 30–43.

Шацилло А.В., Павлов В.Э. Систематика палеомагнитных направлений раннего-среднего девона Минусинских впадин: новые данные и старые проблемы // Физика Земли. 2019. № 3. С. 97–116.

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

Hounslow M.W., Balabanov Y.P. A geomagnetic polarity timescale for the Permian, calibrated to stage boundaries // Lucas S.G., Shen S.Z. (eds.). The Permian Timescale. Geological Society, London, Special Publications. 2016. V. 450. P. 61–103.
https://doi.org/10.1144/SP450.8

Slepian D., Pollak H.O. Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis and uncertainty—I // Bell System Technical Journal. 1961. V. 40. № 1. P. 43–63.
https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1961.tb03976.x

Kodama K.P., Hinnov L.A. Rock magnetic cyclostratigraphy. Wiley Blackwell. 2014. 165 p.
https://doi.org/10.1002/9781118561294

Hasselmann K. Stochastic climate models part I. Theory // Tellus. 1976. V. 28. № 6. P. 473–485.
https://doi.org/10.3402/tellusa.v28i6.11316

Li M., Hinnov L., Kump L. Acycle: Time-series analysis software for paleoclimate research and education // Computers & Geosciences. 2019. V. 127. P. 12–22.
https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.02.011

Kirschvink J.L. The least-square line and plane and the analysis of paleomagnetic data // Geophysical Journal International. 1980. V. 62. № 3. P. 699–718.
https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x

Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., Levrard B. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // Astronomy & Astrophysics. 2004. V. 428. № 1. P. 261–285.
https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041335

McFadden P.L., McElhinny M.W. Classification of the reversal test in palaeomagnetism // Geophysical Journal International. 1990. V. 103. № 3. P. 725–729.
https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb05683.x

Naumcheva M.A., Golubev V.K. Nonmarine ostracodes at the Permian-Triassic boundary of the central part of the East European Platform // Palaeoworld. 2020. V. 29. № 2. P. 353–367.
https://doi.org/10.1016/j.palwor.2019.02.001

Thomson D.J. Spectrum analysis and harmonic analysis // Proc. IEEE. 1982. V. 70. № 9. P. 1055–1096.

Veselovskiy R.V., Dubinya N.V., Ponomarev A.V., Fokin I.V., Patonin A.V., Pasenko A.M., Fetisova A.M., Matveev M.A., Afinogenova N.A., Rud'ko D.V., Chistyakova A.V. Shared Research Facilities "Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism" of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. V. 13. № 2.
https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579

Paleomagnetism and Cyclostratigraphy of the Permian-Triassic Boundary Interval of the Staroe Slukino Section, Vladimir Region

A. M. Fetisova[a, b, *], R. V. Veselovskiy[a, b], K. A. Sirotin[a, b], V. K. Golubev[c], and D. V. Rud'ko[b]

[a] *Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

[b] *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

[c] *Borisyak Paleontological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

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

The paper presents the results of paleomagnetic, rock magnetic, and cyclostratigraphic studies of continental red beds that compose the Permian-Triassic boundary interval of the Staroe Slukino section in the Vladimir Region, Russia. Based on the directions of the characteristic components of the natural remanent magnetization of the studied rocks in the sampled stratum, the intervals of normal and reverse polarity related to the regional magnetozones r_2RnP, r_3RnP, and N_3P-T were identified. Within the r_3RnP zone, there is an interval of anomalous paleomagnetic directions, which has similar characteristics to those identified earlier in the coeval intervals of the Nedubrovo, Zhukov Ravine, and Okskiy Siyezd sections. Revising the biostratigraphy allows us to assume that the two zones of anomalous paleomagnetic directions in the composite magnetic polarity scale of the upper Permian of the Russian Platform are a reflection of the same epoch of an anomalous geomagnetic field configuration. It is estimated by the cyclostratigraphic method that the studied 16 m interval of the Staroe Slukino section took 900±20 thousand years to accumulate, which limits the duration of the geomagnetic field anomalous state near the Permian-Triassic boundary to ~110000 years. A new Permian-Triassic (~252 Ma) paleomagnetic pole of the East European Platform is calculated: plat = 36.3°; plong = = 155.0°; dp/dm = 2.8°/4.8°.

Keywords: paleomagnetism, East European Platform, Russian Platform, Permian, Triassic, magnetostratigraphy, cyclostratigraphy, paleomagnetic pole