

СЕВЕРНАЯ ВЕТВЬ ОКЕАНА ТЕТИС В СРЕДНЕЙ ЮРЕ: ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ПАЛЕОТЕКТОНИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ

© 2025 В.Ю. Водовозов^{1,2}, А.В. Дворова¹, В.С. Буртман¹, Н.В. Сальная¹, С.В. Рудько¹

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017; e-mail: vodo7474@yandex.ru

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 119234

Поступила в редакцию 18.12.2024; после доработки 22.04.2025; принята в печать 25.06.2025

В работе представлены первые палеомагнитные результаты изучения среднеюрских вулканогенно-осадочных пород Северо-Западного Кавказа — чаталтапинской свиты (аален-байос), свиты горы Индюк (аален) и порфиритовой серии (байос), принадлежащих тектонической мегазоне Большого Кавказа. Целью нашей работы являлось определение палеоширотного положения в средней юре тектонического блока СЗ Кавказа и оценка ширины северной ветви палеоокеана Тетис. В результате палеомагнитного анализа была выделена доскладчатая биполярная компонента естественной остаточной намагниченности, среднее направление по всем трем свитам: $D=18.8^\circ$ $I=34.1^\circ$ $k=114.2$ $\alpha_{95}=11.6^\circ$. Путем осреднения виртуальных геомагнитных полюсов свит рассчитан палеомагнитный полюс для байоса СЗ Кавказа ($Plat=60.1^\circ$ $Plong=181.5^\circ$ $A95=12.8^\circ$), согласно этому определению тектонический блок находился в байосе в тропических широтах северного полушария ($19 \pm 13^\circ$). Во всех изученных породах, кроме того, широко проявлены процессы перемагничивания, отвечающие, вероятно, постэоценовому альпийскому орогенезу. С помощью полученных данных и немногочисленных литературных палеомагнитных определений по среднеюрским породам Кавказа и Турции сделана оценка ширины северной ветви океана Тетис, согласно этим данным, она была не меньше 1500 км.

Ключевые слова: Большой Кавказ, палеомагнетизм, палеотектонические реконструкции, Тетис, средняя юра.

ВВЕДЕНИЕ

Тектоническая эволюция крупных структурных элементов литосферы — фундаментальная задача геологии. Наша лепта в решении этой задачи — изучение на основе палеомагнитных данных эволюции территории Кавказско-Малоазиатского сегмента Альпийского складчатого пояса в юрское время. В это время здесь была северная ветвь океана Тетис, однако отсутствие палеомагнитных данных не позволяет количественно определить положение и перемещение различных тектонических блоков в юре, рассчитать возможную ширину палеоокеана. Главным объектом приложения наших сил стали среднеюрские вулканогенно-осадочные породы Северо-Западного Кавказа. Выбор этого региона неслучаен, здесь хорошая геологическая изученность резко контрастирует с полным

отсутствием палеомагнитных данных. Наше исследование направлено на решение проблемы расчета ширины северной ветви океана Тетис и палеомагнитное обоснование юрской палеогеографии рассматриваемого региона.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Восточное Средиземноморье, где находится СЗ Кавказ, сложено интенсивно деформированными образованиями окраин мегаконтинентов Гондваны и Лавразии, здесь выделяется несколько тектонических мегазон (рис. 1). На юге находится Аравийская платформа, на севере расположена Скифская молодая платформа, территория между Аравийской и Скифской платформами — часть альпийского складчатого пояса. Между Гондваной и Лавразией (и позднее — между Африкано-Аравийской

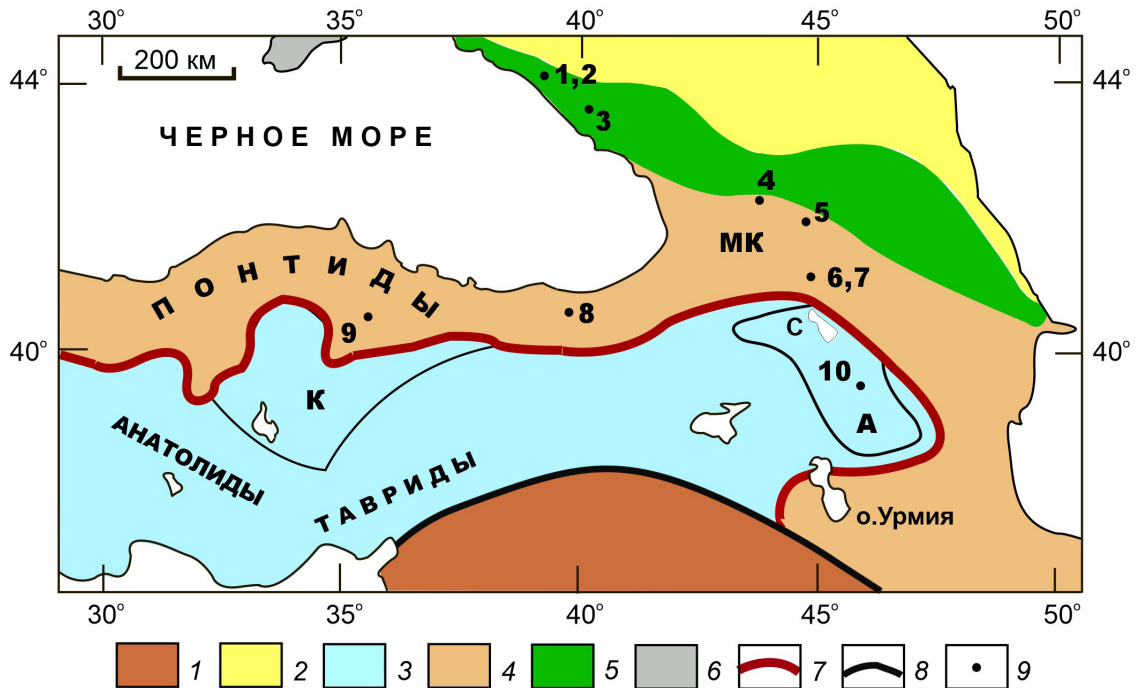


Рис. 1. Тектонические мегазоны в Кавказско-Малоазиатском регионе: 1 — Аравийская древняя платформа; 2 — Скифская варисская платформа; 3–6 — мегазоны Альпийского складчатого пояса: 3 — Анатолидо-Армянская (массивы: К — Киршехир, А — Армянский), 4 — Понтидо-Закавказская, 5 — Большой Кавказ, 6 — Крым; 7–8 — океанические сuture (7 — Неотетиса, 8 — Мезотетиса); 9 — участки палеомагнитных исследований, результаты которых рассмотрены в статье (табл. 2). МК — Малый Кавказ, С — озеро Севан.

Fig. 1. Tectonic megazones of the Caucasus-Minor Asia region: 1 — Arabian craton; 2 — Scythian Variscan platform; 3–6 — megazones of the Alpine folded belt: 3 — Anatolide-Armenian (massifs: К — Kirshehir, А — Armenian), 4 — Pontide-Transcaucasian, 5 — Greater Caucasus, 6 — Crimea; 7–8 — oceanic sutures (7 — Neotethys, 8 — Mesotethys); 9 — areas of paleomagnetic studies, the results of which are discussed in the paper (Table 2). МК — Lesser Caucasus, С — Lake Sevan.

и Восточно-Европейской платформами) от триаса до позднего кайнозоя простирался океан Тетис. В триасе и в раннеюрское время от Гондваны отделились сиалические блоки, ставшие микроконтинентами в Тетисе. В аалене началась субдукция коры Тетиса под Лавразию и гондванские микроконтиненты стали перемещаться в сторону Лавразии (Dercourt et al., 1986; Hassig et al., 2013; Kazmin, Tikhonova, 2006; Maffione, Hinsbergen, 2018; Rolland et al., 2017; Sengor, Yilmaz, 1981; Stampeli, Kozur, 2006). Полоса этих микроконтинентов отделила северную ветвь Тетиса — Мезотетис, который был закрыт в поздне меловое время в результате коллизии микроконтинентов Тетиса с Лавразией. Сutura Мезотетиса прослежена от Малого Кавказа до Карпат (Burtman, 1994).

В позднем аалене — раннем байосе окраина Лавразии стала активной — началась субдукция океанической коры Мезотетиса. На территории Большого Кавказа этот процесс сопровождался формированием новых тектонических структур. Возникший в байосе на окраине Лавразии Понтийско-Закавказский вулcano-плутонический субдукционный пояс занял часть территории

Большого Кавказа. В Северо-Западном Кавказе этому субдукционному поясу принадлежит Абхазо-Рачинская тектоническая зона, в которой в байосе была сформирована мощная толща андезитов-базальтов, их туфов, туфобрекчий, туфопесчаников (порфиритовая серия). Раннеюрский бассейн Большого Кавказа стал в байосе задуговым глубоководным бассейном, в котором накапливались глинистые и флишевые осадки и происходила активная вулканическая деятельность. В бате рассматриваемая зона подверглась интенсивным деформациям (Большой..., 2007).

В тектонической структуре СЗ Кавказа можно выделить пять структурных этажей, каждый из которых соответствует крупному этапу геологического развития территории и отделенных друг от друга поверхностями региональных несогласий: верхнепротерозойско-среднепалеозойский, среднекаменноугольно-нижнетриасовый, ниже-среднеюрский, келловей-эоценовый, олигоцен-антропогеновый (Маринин и др., 2003, 2008; Яковлев и др., 2008).

В ниже-среднеюрском структурном этаже выделяется ряд структурно-фациальных зон: Абхазо-Рачинская, Краснополянская, Гойтхская,

Псехако-Березовская, Псешхинская и Архыз-Гузерильская (Маринин и др., 2008). Объекты нашего исследования находились в осевой части и на южном склоне Главного Кавказского хребта (рис. 2), они представлены среднеюрскими вулканогенно-осадочными породами чаталтапинской свиты (Псехако-Березовская структурно-фациальная зона), свиты горы Индюк (Гойтхская зона) и порфиритовой серии (Абхазо-Рачинская зона). *Чаталтапинская свита* сложена аргиллитами, с прослоями алевролитов, глинистых сидеритов и горизонтами базальтовых порфиров и их туфов. Мощность свиты более 1700 м. Возраст отложений определялся как ааленский, на основании стратиграфического положения и находок аммонитов (Лаврищев, Пруцкий, 2002). Согласно изотопным данным (Герасимов и др., 2022), излияние базальтовых порфиров чаталтапинской свиты происходило в самом начале байоса — 169 +/- 1.5 млн лет назад. *Свита г. Индюк* представлена аргиллитами с прослоями песчаников, алевролитов, туффитов и туфов риодацитов. Общая мощность — более 750 м.

Позднеааленский возраст определен на основании палеонтологических находок. *Порфириновая серия* сложена туфобрекчиями, переслаиваемыми с алевро-псаммитовыми туфами основного состава, аргиллитами, содержащими лавы базальтов. Байосский возраст пород установлен на основании положения в разрезе и палеонтологии.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Полевые и лабораторные исследования, обработка результатов выполнялись по стандартным методикам (Храмов и др., 1982, Таухе, 2010).

Полевые работы. Отбор ориентированных образцов для палеомагнитного анализа проводился сайтами. Каждый сайт представлял собой отдельное обнажение осадочных или один поток вулканических пород мощностью до 10–15 м, из которых вручную отбиралось от 12 до 35 независимо ориентированных образцов. Ориентировка выполнялась с помощью горного компаса с ценой деления 1 градус. Поправка за магнитное

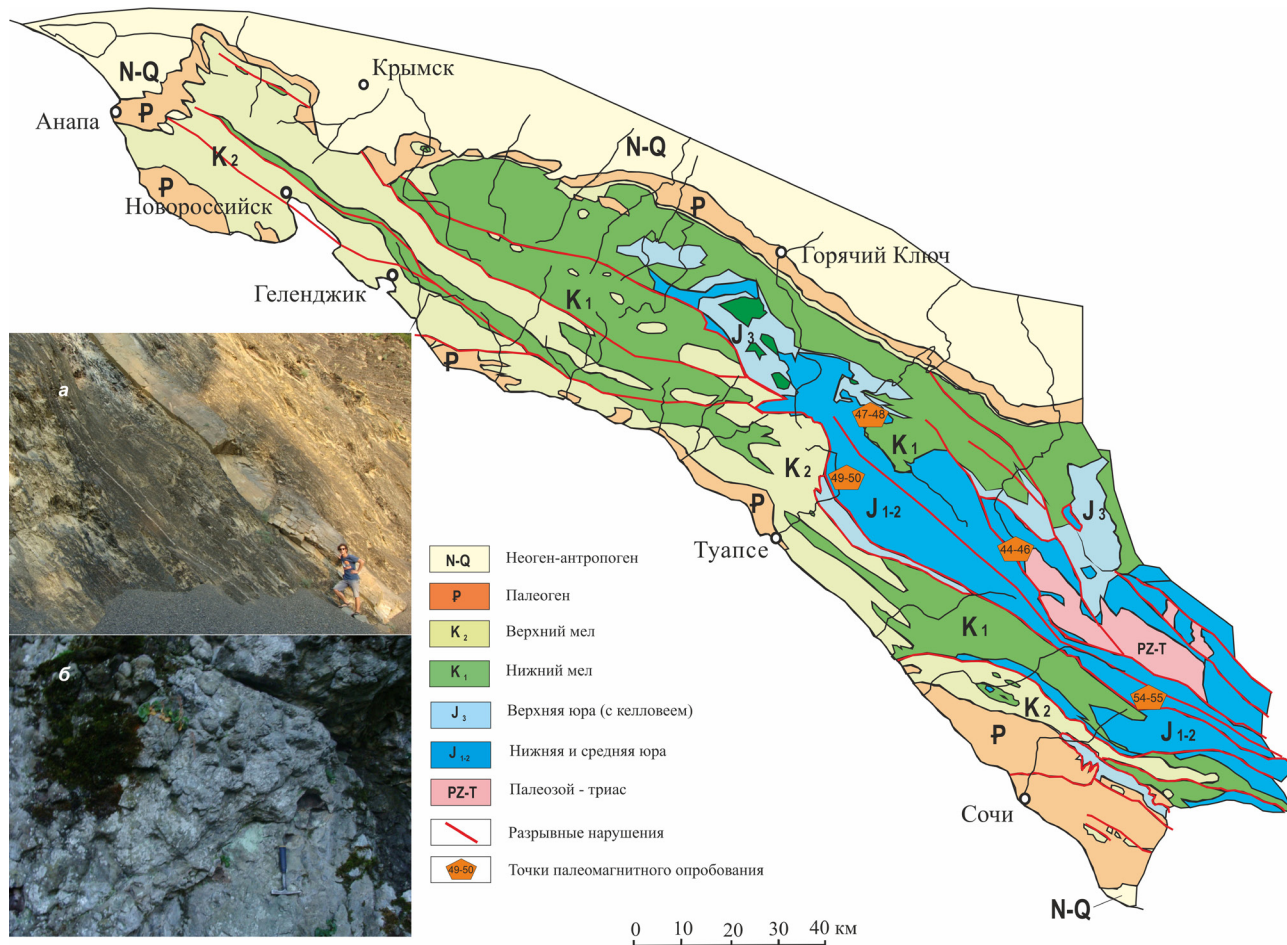


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Северо-Западного Кавказа (Маринин, Расцветяев, 2008). На фотографиях — точки палеомагнитного опробования: а — № 48, б — № 44.

Fig. 2. Schematic geological map of the North-West Caucasus (Marinin, Rascvetayev, 2008). The photographs show paleomagnetic says: а — No. 48, б — No. 44.

склонение $+7^\circ$ по модели IGRF^{13th} (Alken et al., 2021) вносилась на стадии лабораторных измерений. Привязка сайтов осуществлялась с помощью приемника GPS, с точностью определения горизонтальных координат до 5–10 м. В лавовых потоках с подушечной отдельности чаталтапинской свиты применялась методика массового (десятки замеров) измерения ориентировок «хвостиков» подушек для определения залегания потока. Во всех свитах удалось опробовать слои с разными элементами залеганиями для проведения теста складки. Для палеомагнитного анализа всего было отобрано и изучено 125 образцов из 8 отдельных тел, из них 52 образца из 3 тел вулканитов и 73 образца из 5 сайтов вулканогенно-осадочных пород.

Лабораторные исследования. Перед началом магнитных чисток измерялась величина объемной магнитной восприимчивости (k) и ее анизотропия (АМВ) на каппа-мосте MFK-1 (AGICO, Чехия) в лаборатории палеомагнетизма Геологического института (ГИН) РАН. Часть образцов прошла дополнительные петромагнитные исследования, направленные на характеристику состава и строения ферромагнитной фракции. Они были выполнены в лаборатории главного геомагнитного поля и петромагнетизма Института физики Земли (ИФЗ) им. О.Ю. Шмидта РАН на вибрационном магнитометре VSM Micromag (Lake Shore, США) и вибромагнитометре конструкции Ю.К. Виноградова и включали в себя исследование петель гистерезиса в полях 0.3–1 Тл и обратного разрушающего поля до 1 Тл, а также кривые намагниченности от температуры, снятые в поле 0.7 Тл до 700 °С. Для получения и анализа компонент естественной остаточной намагниченности (ЕОН) применялось ступенчатое терморазмагничивание в лаборатории палеомагнетизма ГИН РАН. Все 125 образцов были полностью размагничены с интервалом от 10 до 50 °С (от 16 до 23 шагов) вплоть до температуры 680 °С в экранированной печи TD48 (ASC Scientific, США) с измерением величины и направления после каждого нагрева на спинмагнитометре JR-6 (AGICO, Чехия), помещенном в кольца Гельмгольца.

Обработка результатов. Обработка и интерпретация измерений анизотропии магнитной восприимчивости проводилась при помощи программы Anisoft 4.2 (AGICO, Чехия). Структурное состояние минералов-носителей намагниченности анализировалось с помощью диаграмм Дэй-Данлопа (Day et al., 1977; Dunlop, 2002), по начальным значениям магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности рассчитывалось также отношение Кенигсбергера (фактор Q). Разделение компонент намагниченности выполнялось при помощи компонентного анализа, при

этом применялся пакет компьютерных программ Рэндальфа Энкина (Enkin, 1994), использующих стандартные алгоритмы (Kirschvink, 1980; Zijdeveld, 1967). При компонентном анализе анализировались не только направления, но и круги перемагничивания, при расчете среднего направления согласно (McFadden, McElhinny, 1988) они использовались совместно. Селекция выделенных направлений проводилась в основном вручную, в сложных случаях помогал пакет программ «Select» (Шипунов, 2000). Для анализа биполярного распределения использовался тест обращения (McFadden, McElhinny, 1990), для определения возраста выделенных компонент применялся тест складки DC (Enkin, 2003). Для обоснования возраста метакронных компонент остаточной намагниченности применялся метод пересечения плоскостей перемагничивания (Палеомагнитология, 1982; Halls, 1976) и подход, предложенный в работе (Баженов, Шипунов, 1988). Для поиска и анализа палеомагнитных определений по Восточному Средиземноморью использовалась мировая палеомагнитная база данных GPMDB (Pisarevsky et al., 2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Петромагнетизм. Образцы по ЕОН слабые, значения варьирует от 0.05 до 28.6 мА/м с медианным значением 0.585 мА/м; при этом магматические породы ожидаемо более сильные, чем осадочные — их медиана 1.5 мА/м, у осадочных втрое меньше — 0.427 мА/м. Значения начальной магнитной восприимчивости образцов варьирует от $0.09 \cdot 10^{-3}$ до $1.9 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. По начальным значениям величин остаточной намагниченности и магнитной восприимчивости рассчитан фактор Q и его величина меняется в широких пределах от 0.003 до 1.55 (рис. 3а), что служит указанием на возможные сложности для записи и сохранения породами остаточной намагниченности. В вулканитах фактор Q заметно выше, он меняется от 0.012 до 1.55, в осадочных породах — от 0.003 до 0.197.

Представительная коллекция образцов (10 из эффузивов и 16 из осадочных пород) прошли дополнительные лабораторные испытания — были сняты петли гистерезиса в полях до 0.3–1 Тл и кривые обратного разрушающего поля до 1 Тл. Результаты исследований показали, что петли гистерезиса с коррекцией за диа- и парамагнитные частицы (их влияние оказалось высоким) характеризуются намагничиванием в относительно низких полях и связаны с низкокоэрцитивным минералом; отсутствие перетяжки на петлях гистерезиса свидетельствует о том, что влияния высококоэрцитивных минералов здесь не обнаруживается. При этом не наблюдается

какого-либо значимого различия в результатах, полученных по эффузивным и вулканогенно-осадочным породам. Гистерезисные параметры — отношения остаточной намагниченности насыщения к намагниченности насыщения (J_{rs}/J_s), а также остаточной коэрцитивной силы

к коэрцитивной силе (H_{cr}/H_c), нанесенные на диаграмму Дэй-Данлопа (Day et al., 1977; Dunlop, 2002), попадают преимущественно в область псевдооднодоменного размера магнитных зерен (рис. 3б); небольшие отклонения объясняются слабо измеряемым магнитным моментом и,

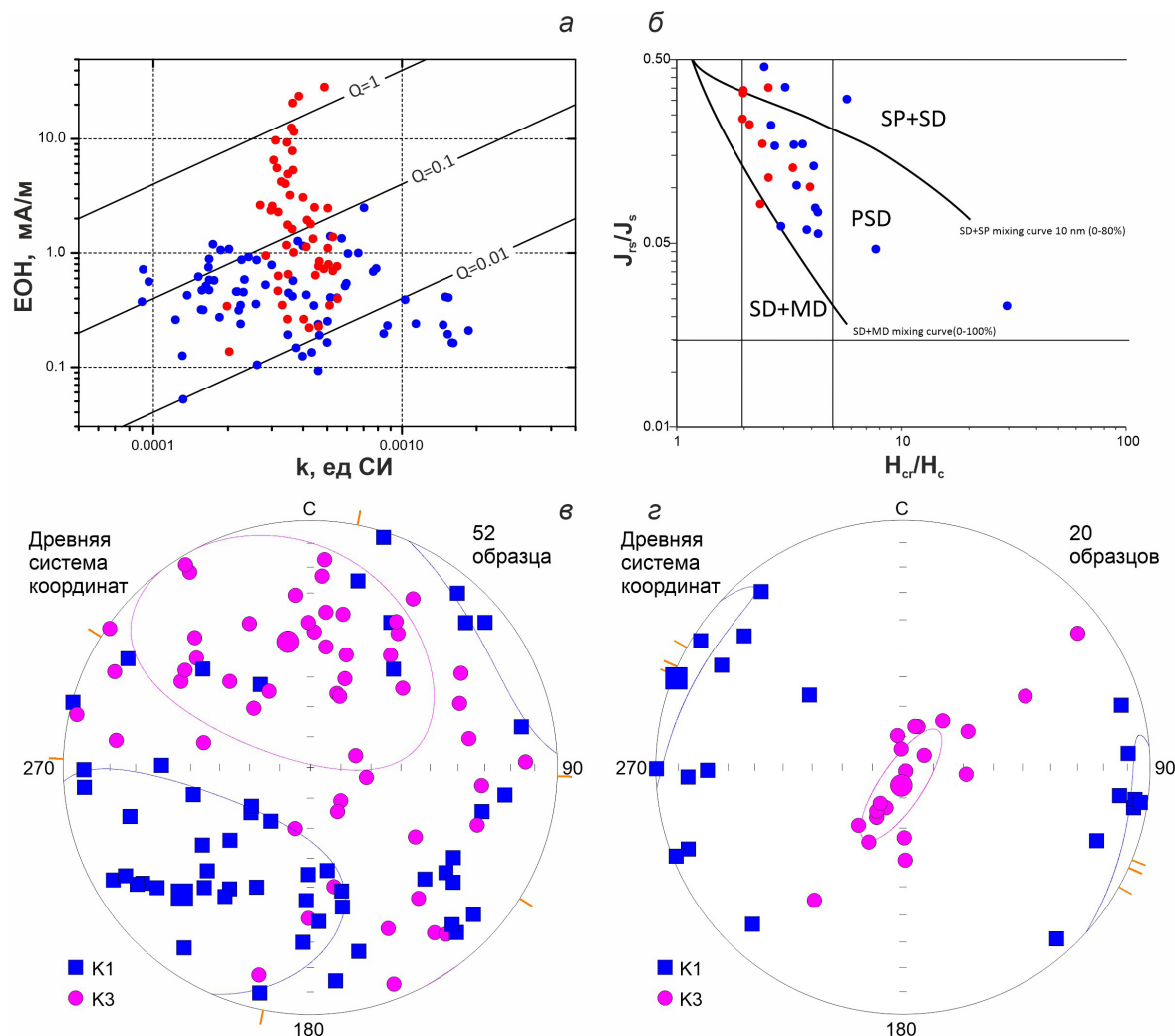


Рис. 3. Петромагнитные свойства образцов среднеюрских пород СЗ Кавказа: *a* — отношение Кенигсберга: начальная магнитная восприимчивость (горизонтальная ось), начальная остаточная намагниченность (вертикальная ось), масштаб логарифмический, красные кружки — вулканы, синие — вулканогенно-осадочные породы; *b* — диаграмма Дэй-Данлопа: горизонтальная ось — отношение остаточной коэрцитивной силы к коэрцитивной силе, вертикальная ось — отношение остаточной намагниченности насыщения к намагниченности насыщения, масштаб логарифмический, SP — суперпарамагнитные частицы, SD — однодоменные, PSD — псевдооднодоменные, MD — многодоменные, красные кружки — вулканы, синие — вулканогенно-осадочные породы; *в* и *г* — стереограммы распределения максимальной и минимальной осей эллипсоида анизотропии начальной магнитной восприимчивости, их средние направления и доверительные интервалы образцов вулканических пород (*в*) и туфопесчаников порфириновой серии (*г*), светлокоричневые штрихи — азимуты простирания пород.

Fig. 3. Petro-magnetic properties of samples of Middle Jurassic rocks of the North-West Caucasus: *a* — Koenigsberger ratio: initial magnetic susceptibility (horizontal axis), initial remanent magnetization (vertical axis), logarithmic scale, red circles — volcanics, blue circles — volcano-sedimentary rocks; *b* — Day-Dunlop diagram: horizontal axis — ratio of remanent coercivity to coercivity, vertical axis — ratio of saturation remanent magnetization to saturation magnetization, logarithmic scale, SP — superparamagnetic particles, SD — single-domain, PSD — pseudo-single-domain, MD — multidomain, red circles — volcanics, blue circles — volcano-sedimentary rocks; *в* and *г* — stereograms of the distribution of the maximum and minimum axes of the anisotropy ellipsoid of the initial magnetic susceptibility, their average directions and confidence intervals of samples of volcanic rocks (*в*) and tuff sandstones of the porphyrites series (*г*), light brown strokes — rock strike.

соответственно, большой погрешностью расчетных параметров. Кривые зависимости намагниченности в поле 0.7 Тл, снятые до 700 °С, оказались непоказательными и говорят о слишком сильном влиянии парамагнитных частиц. Основными носителями намагниченности, по-видимому, являются магнетит, маггемит и титаномаггемит.

Измерения анизотропии начальной магнитной восприимчивости показали, что все породы обладают низкой анизотропией, медиана всех образцов составляет 1.7 %. Причем вулканиды практически изотропны — их медиана равна 0.8 %, у осадочных пород АМВ выше — 2.6 %. Уплощенных форм эллипсоида магнитной восприимчивости больше, чем удлинённых, но в силу маленьких значений АМВ у многих образцов это практически шар. У образцов вулканических тел ориентировки главных осей эллипсоида АМВ не образуют кучных распределений, видимо, в силу низких значений анизотропии магнитной восприимчивости (рис. 3в). У образцов вулканогенно-осадочных пород распределения главных осей АМВ более кучные; максимальная ось АМВ приурочена к простираанию слоев, а минимальная практически перпендикулярна им, особенно наглядно это видно на примере туфопесчаников порфиритовой серии одного из сайтов (рис. 3з). Подобное поведение характерно для слабодеформированных туфогенных пород (Tarling, Hrouda, 1993).

В целом, петромагнитные исследования показали относительную пригодность этих пород для палеомагнитных исследований — коэрцитивные параметры и анизотропия магнитной восприимчивости ожидаемы и приемлемы, но низкие величины остаточной намагниченности и большое количество парамагнитных минералов в совокупности с недостаточным количеством ферромагнитных минералов не способствуют хорошей палеомагнитной записи.

Палеомагнитный анализ. В результате исследований были выделены близкие к первичным компоненты ЕОН во всех изученных толщах (чаталтапинской свиты, свиты горы Индюк и порфиритовой серии). Во всех толщах также была выделена метахронная компонента намагниченности, связанная, вероятно, с региональным процессом перемагничивания.

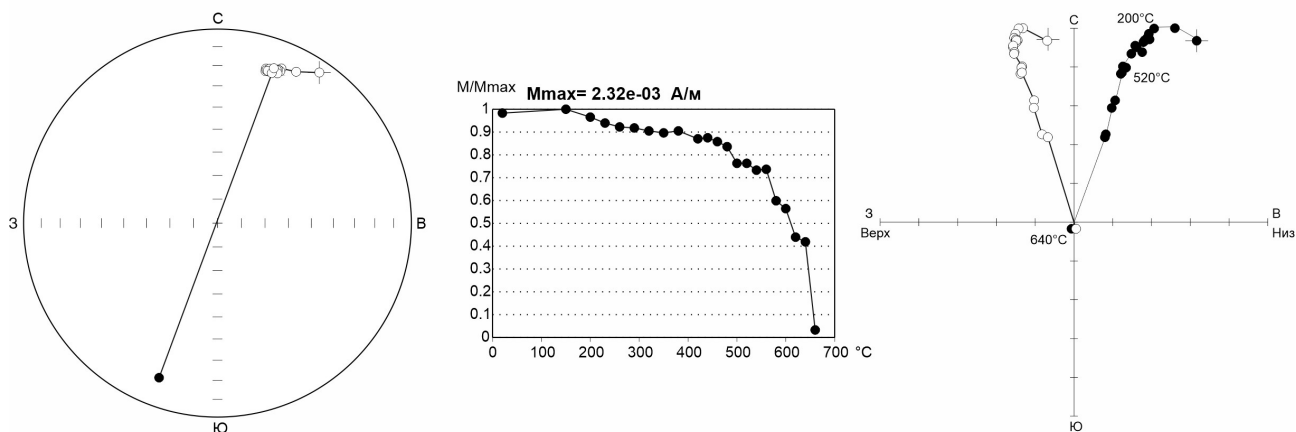
Чаталтапинская свита (J_2a-b). Исследованы четыре точки, три из которых (№№ 44, 46, 47) представлены метаморфизованными базальтами (палеобазальтами) с подушечной отдельностью, одна (№ 48) — туфогенными песчаниками и алевролитами (рис. 2). Всего отобрано и исследовано 69 образцов. Качество палеомагнитной записи в точках различается, но можно выделить общий характер поведения ЕОН в ходе чистки. На диа-

граммах Зийдервельда (рис. 4) выделяются 2–3 компоненты ЕОН и круги перемагничивания. Низкотемпературная компонента счищается до 200–230 °С и группируется на стереограмме вокруг направления современного геомагнитного поля (в современной системе координат — ССК). В двух точках (№№ 47, 48) в среднемтемпературном интервале от 230 до 460 °С выделяется компонента намагниченности, которая на стереограмме образует кучные кластеры в 4-м квадранте (в ССК). Высокотемпературная компонента ЕОН выделяется как на большом интервале температур — от 230 до 600–620 °С, так и на относительно узком, начиная с 520 °С. Эти компоненты не всегда идут в ноль на диаграммах Зийдевелда, что скорее всего связано с неполным разделением средне- и высокотемпературных компонент. На стереограмме высокотемпературные компоненты образуют бимодальное распределение в 1-м и 3-м квадрантах (в древней системе координат — ДСК). В средне- и высокотемпературном интервале выделяются также круги перемагничивания, их пересечение лежит в 1-ом квадранте, вблизи направления высокотемпературной компоненты.

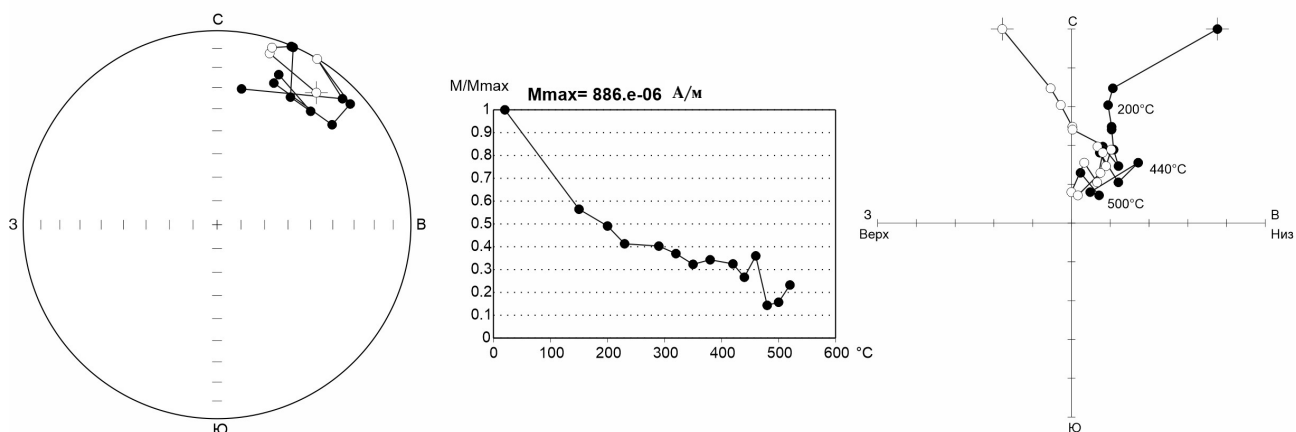
В породах чаталтапинской свиты по характеристическим векторам высокотемпературной компоненты и с помощью кругов перемагничивания мы рассчитали по всем четырем средним направлениям сайтов среднее направление свиты (табл. 1, рис. 5б). Тест складки DC (Enkin, 2003) для этого направления положительный, тест обращения (McFadden, McElhinny, 1990) также положительный $\gamma/\gamma_c = 19.0/19.3$ (класс «С»). В образцах двух точек были обнаружены среднетемпературные компоненты, которые образуют кучные распределения в современной системе координат, тест складки DC (Enkin, 2003) отрицательный. На наш взгляд, эти среднетемпературные компоненты отражают реальное направление геомагнитного поля более позднего тектоно-термального события.

Свита горы Индюк (J_2a). Изучено 17 образцов из двух сайтов (№№ 49 и 50), породы представлены туфогенными песчаниками и аргиллитами. Почти все образцы, за исключением одного, характеризуются низкой величиной ЕОН — менее 1 мА/м. Качество палеомагнитной записи плохое, после 400–460 °С в большинстве образцов сигнал становится слишком слабым, а запись хаотичной. На диаграммах Зийдервельда уверенно выделяются только компоненты в интервале от 230 до 460–500 °С и круги перемагничивания. При совместном использовании этих компонент и кругов перемагничивания согласно (McFadden, McElhinny, 1988) удалось выделить среднее направление, которое лежит в 1-м квадранте и статистически не отличается от среднего

Чаталтапинская свита



Свита горы Индюк



Порфиритовая серия

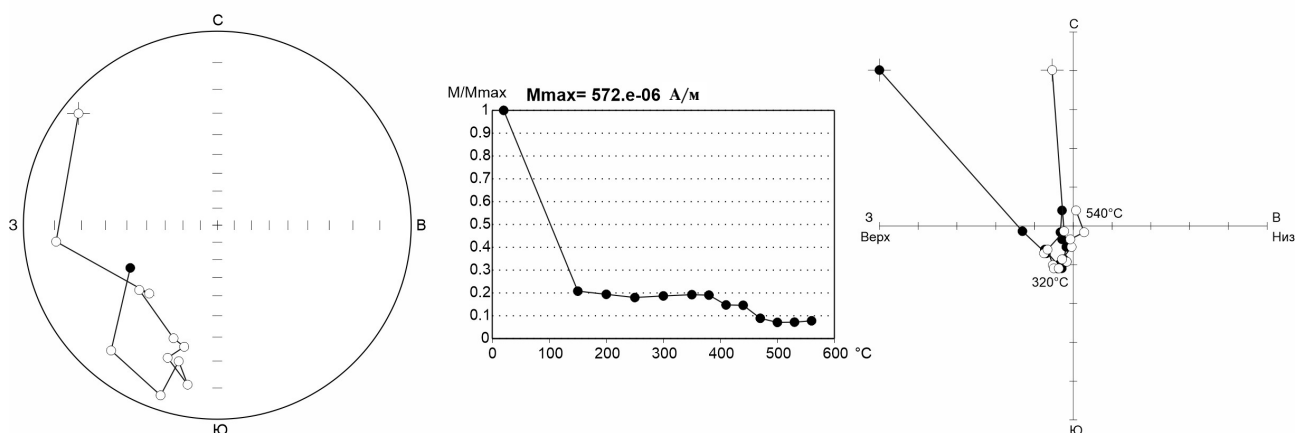


Рис. 4. Примеры поведения образцов при температурной магнитной чистке (стереограммы, кривые размагничивания и диаграммы Зейдвервельда; древняя система координат; черные кружки — проекции векторов на нижнюю полусферу/горизонтальную плоскость, белые кружки — на верхнюю полусферу/вертикальную плоскость)

Fig. 4. Examples of samples behavior during thermal demagnetization (stereograms, demagnetization curves and Zijderveld diagrams; stratigraphic coordinate system; black circles — projections of vectors onto the lower hemisphere/horizontal plane, white circles — onto the upper hemisphere/vertical plane)

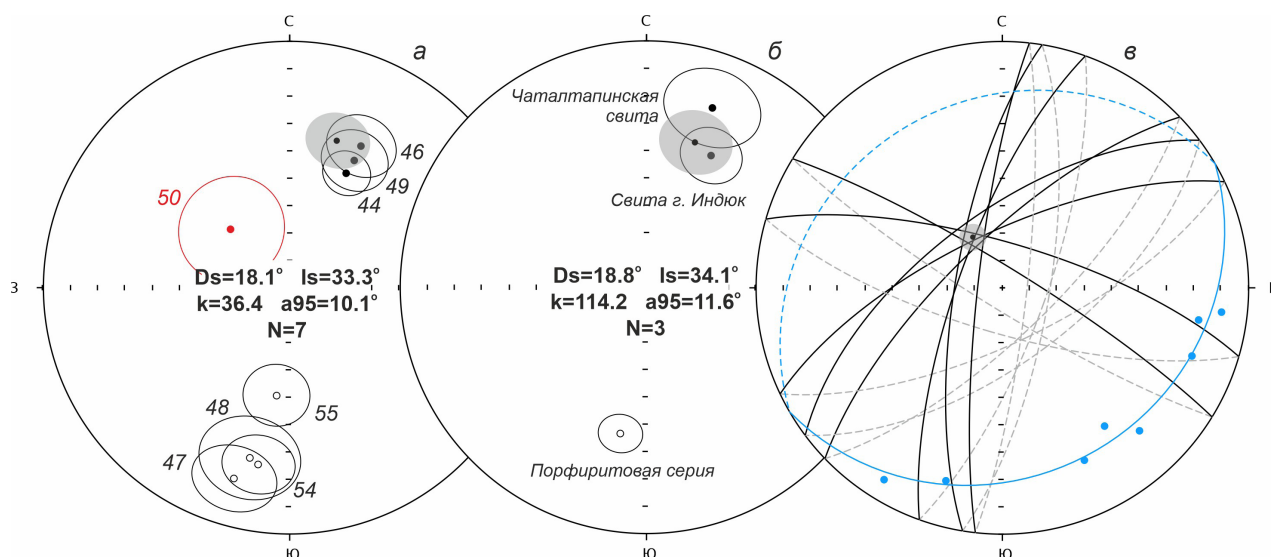


Рис. 5. Стереограммы: *a* — средние направления по сайтам в древней системе координат, красным выделена точка 50, которая исключена из расчета, числа рядом с овалами доверия — номера точек (табл. 1, рис. 2); *б* — средние направления по свитам в древней системе координат; *в* — большие круги перемагничивания в современной системе координат (голубым цветом показаны нормали к ним и аппроксимирующий круг). Проекция векторов на нижнюю полусферу — черные кружки, на верхнюю — белые; серым цветом показан овал доверия вокруг среднего направления выборки.

Fig. 5. Stereograms: *a* — mean directions by sites in the stratigraphic coordinate system, point 50, which is excluded from the calculation, is highlighted in red; the numbers next to the confidence ovals are the numbers of points (Table 1, Fig. 2); *б* — mean directions by suites in the stratigraphic coordinate system; *в* — large remagnetization circles in the modern coordinate system (the normals to them and the approximating circle are shown in blue). The projections of vectors on the lower hemisphere are black circles, on the upper hemisphere — white; the confidence oval around the average direction of the sample is shown in gray.

направления одновозрастной чаталтапинской свиты (табл. 1, рис. 5б). Тест складки DC (Enkin, 2003) неопределенный в силу, видимо, малых различий элементов залегания.

Порфиритовая серия (J_2b). Изучено 39 образцов, отобранных из двух сайтов (№№ 54 и 55) туфопесчаников. Качество палеомагнитной записи лучше, чем в образцах свиты горы Индюк, но хуже, чем в чаталтапинской свите. На диаграммах Зийдервельда выделяют 1–2 компоненты ЕОН и круги перемагничивания. Низкотемпературная компонента счищается до 250 °С, она большая по величине и группируется вокруг направления современного геомагнитного поля (в ССК). Высокотемпературные компоненты выделяются в интервале от 440 до 600 °С примерно в трети образцов, характеристических среди них мало. Почти во всех образцах можно выделить круги перемагничивания, захватывающие часто широкий диапазон температур. В древней системе координат их пересечения образуют кучное распределение в I-ом квадранте. Среднее значение по свите было получено по высокотемпературным компонентам и кругам обоих сайтов (табл. 1, рис. 5б), тест складки DC (Enkin, 2003) для этого распределения неопределенный.

Для всех трех изученных толщ СЗ Кавказа мы получили средние направления высокотем-

пературных компонент ЕОН. Средние значения как по точкам (за исключением точки № 50 свиты горы Индюк), так и по свитам статистически не отличаются друг от друга (рис. 5а, 5б). Тест обращения (McFadden, McElhinny, 1990) положительный: $\gamma/\gamma_c=14.8/18.7$ (класс «С»). Тест складки DC (Enkin, 2003) также положительный, и на уровне сайтов, и на уровне свит.

Метахронная остаточная намагниченность (после J_2b). Это хронологически вторичная компонента естественной остаточной намагниченности, время образования которой заметно оторвано от времени первичного формирования горной породы. Проявлена в большей или меньшей степени во всех изученных нами сайтах. Может встречаться в виде устойчивой среднетемпературной компоненты (при наличии высокотемпературных), образующей кучные распределения на стереограмме, но чаще воздействие этой компоненты ощущается в кругах перемагничивания и неантиподальности биполярных распределений высокотемпературных компонент, что можно интерпретировать как результат сложения первичной и метахронной компонент.

Для уточнения направления эпохи гипотетического перемагничивания мы применили метод пересечения плоскостей перемагничивания (Палеомагнитология, 1982; Halls, 1976) и подход,

Таблица 1. Высокотемпературные компоненты ЕОН образцов среднеюрских пород СЗ Кавказа и рассчитанные по ним полюсы**Table 1.** The high temperature components of NRM and calculated VGPs of samples of Middle Jurassic rocks of the North-West Caucasus

точка	породы	n/N	Направление ЕОН							
			ССК				ДСК			
Чаталтапинская свита (J₂a-b)										
44	Палеобазальт	10/11	12.3	77.8	41.5	8.0	26.5	43.3	41.5	8.0
46	Палеобазальт	13/21	38.9	53.7	12.0	10.8	26.9	32.0	17.1	17.1
47	Палеобазальт	8/20	206.5	-9.5	28.2	11.9	196.2	-17.4	28.2	11.9
48	Туфопесчаник	11/17	192.8	41.6	8.8	16.8	193.2	-26.1	10.7	15.1
χ сайты		4/4	24.2	27.2	2.5	74.2	20.2	29.8	42.6	14.2
Виртуальный геомагнитный полюс (место отбора: φ=44.2° λ=39.5°)										
Φ, °		Λ, °				d _p /d _m , °		φ _m , °		
57.0		181.9				8.7/15.7		16		
Свита горы Индюк (J₂a)										
49	Туфопесчаник	10/10	35.5	81.9	19.5	11.4	27.1	37.8	21.3	10.9
50	Аргиллит	4/7	12.7	53.0	34.6	16.8	315.1	59.9	27.3	18.9
χ обр.		11/17	12.8	81.2	14.4	12.7	26.2	36.4	21.5	10.3
Виртуальный геомагнитный полюс (место отбора: φ=44.2° λ=39.3°)										
Φ, °		Λ, °				d _p /d _m , °		φ _m , °		
57.4		167.9				7.0/12.0		20		
Порфиритовая серия (J₂b)										
54	Туфопесчаник	14/19	203.8	-15.6	5.9	17.8	190.0	-24.4	15.3	10.7
55	Туфопесчаник	16/20	193.3	-0.4	11.8	11.3	187.0	-50.4	11.8	11.3
χ обр.		29/39	199.6	-6.8	7.8	10.1	190.1	-35.7	15.0	7.2
Виртуальный геомагнитный полюс (место отбора: φ=43.7° λ=40.2°)										
Φ, °		Λ, °				d _p /d _m , °		φ _m , °		
-64.2 (64.2)		17.8 (197.8)				4.8/8.3		-19 (19)		
Палеомагнитный полюс (средний по трем свитам)										
Φ, °		Λ, °				A95, °		φ _m , °		
60.1		181.5				12.8		19		

Примечание. n/N — число образцов (сайтов) использованных/изученных; ССК и ДСК — современная и древняя системы координат; D° и I° — склонение и наклонение; k — кучность; α95° и A95° — радиус круга доверия вокруг среднего с 95 % вероятностью; χ обр. и χ сайты — средние направления на уровне образцов и сайтов; φ и λ — широта и долгота места отбора; Φ° и Λ° — широта и долгота палеомагнитного полюса; d_p/d_m — полуоси овала доверия вокруг полюса; φ_m° — палеоширота.

Notes. n/N — number of samples (sites) used/studied; ССК и ДСК — geographic and stratigraphic coordinate systems; D° and I° — site mean declination and inclination; k — precision parameter of Fisher; α95° and A95° — radius of cone of 95 % confidence; χ обр. и χ сайты — mean NRM at the level of samples and sites; Φ° and Λ° — site latitude and longitude; α95° and A95° — latitude and longitude of the palaeopole; d_p/d_m — semi-axes of the cone of confidence about the pole; φ_m° — paleolatitude.

предложенный в работе (Баженов, Шипунов, 1988). Метод пересечения плоскостей перемангничивания используют для определения наиболее кучной компоненты намагниченности (до- или послескладчатой) для точек с различающимися элементами залегания. В нашем случае мы исходим из предположения, что круги перемангничивания представляет собой сумму первичных среднеюрских компонент ЕОН и вторичных компонент, отвечающих вре-

мени перемангничивания, которое произошло после эпохи складчатости (на это указывает отрицательный тест складки для среднетемпературных компонент). В работе (Баженов, Шипунов, 1988) использован метод пересечения плоскостей перемангничивания для выделения из суммарной намагниченности доскладчатой и послескладчатой компонент («метод складки») и цитируемые авторы предлагают три способа проведения плоскостей перемангничивания:

через планарные распределения, по образцам, смещающимся по большому кругу, и через биполярные неантиподальные распределения. Для построения плоскостей мы использовали круги, выделенные по распределениям среднетемпературных компонент точек 47 и 48, через биполярные распределения высокотемпературных компонент точек 44 и 46, 44 и 47, 44 и 48 и аппроксимирующие круги среднетемпературных компонент точек 49, 50 и 55, которые смещаются вдоль большого круга. Итого получилось 8 кругов перемагничивания. Существовало опасение, что в итоге мы получим только направление более кучной первичной компоненты, но подбор кругов, которые «максимально» содержат вторичные компоненты и отвечают разновозрастным породам, позволил, как нам кажется, избежать этой опасности. На стереограмме эти 8 плоскостей пересекаются в малой части сферы, в современной системе координат: $D=330^\circ$ $I=69^\circ$ $k=250$ $\alpha 95=4^\circ$ (рис. 5в). Пересечение плоскостей перемагничивания (направление эпохи гипотетического регионального перемагничивания) близко к направлению современного магнитного поля в районе работ ($D=6.8^\circ$, $I=62.4^\circ$) по IGRF^{13th} (Alken et al., 2021), но не перекрывается с ним.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблицу 1 сведены результаты проведенных исследований. Средние направления выделенных компонент ЕОН по сайтам и по свитам близки (рис. 5а, 5б), они подкрепляются двумя положительными тестами палеомагнитной надежности — складки и обращения. С учетом того, что поздний байос и бат являются временем основных деформаций в этом структурном этаже (Большой..., 2007), эти направления являются первичными. Для получения палеомагнитного полюса по средней юре СЗ Кавказа мы рассчитали для каждой из свит свой полюс и затем их осреднили. Этот полюс является палеомагнитным (осредненным за палеоокеанские вариации), т.к. получен по породам, интервал образования которых превышает 10^5 лет.

Для оценки качества полученного определения можно применить широко используемые критерии палеомагнитной надежности Ван дер Ву (Van der Voo, 1990). Из 7 максимальных баллов нашему результату можно присвоить 5 или 6, поскольку у нас хорошо определен возраст пород, проведена качественная магнитная чистка, есть достаточная статистика, две полярности и положительный тест складки. Не очень понятно, к какой территории можно отнести это определение, и так же непонятно с какими более молодыми полюсами надо сравнивать наш. С более молодыми полюсами, к примеру,

стабильной Европы (Torsvik et al., 2012) наше определение не совпадает.

Реконструкция северной части палеоокеана Тетис в средней юре осложнена малым количеством палеомагнитных данных, необходимых для количественных построений. В выборку палеомагнитных данных по разновозрастным породам Кавказа и Понтида (табл. 2) кроме полученных нами, вошли литературные данные, которые согласно нашим критериям пригодны для построения среднеюрской реконструкции. Критерии достаточно мягкие: должно быть проведено полное ступенчатое размагничивание образцов; имеются доказательства первичности намагниченности (положительные полевые тесты); среднеюрский возраст пород имеет четкое обоснование. Таких определений набралось всего три, причем два из них это результаты работ Д.М. Печерского с коллегами 1979 г. в Грузии и Армении (Асанидзе, Печерский, 1979; Нгуен и др., 1979). Для этих определений пришлось сделать некоторые послабления, здесь детальная магнитная чистка проводилась для небольшой части образцов, все остальные чистились до «заданных величин», но этого, по-видимому, хватило для адекватного выделения доскладчатых компонент намагниченности. Еще одно исключение мы сделали для полюса, полученного М.Л. Баженовым с соавторами (1991) по вулканитам Армянского массива, имеющих близкий к рассматриваемому временному интервалу возраст плинсбах — тоар. Это определение сделано на современном методическом уровне и подкрепляется положительными тестами складки, обращения и конгломератов. В выборку не вошли определение М.Л. Баженова с соавторами (Bazhenov et al., 1996) по среднеюрским породам Армянского массива, авторы статьи сами считают полученные высокие значения палеошироты по этим породам артефактом. Остальные юрские палеомагнитные определения этих районов сделаны либо по более древним породам, либо более молодым.

Для простоты сравнения полюсы отдельных участков районов были осреднены, а из среднего полюса были получены параметры палеошироты (табл. 2). Большие ошибки определения палеошироты связаны с малым количеством полюсов, но мы можем быть уверены, что палеоокеанские вариации в нашем случае осреднены. Для Армянского массива (№ 10) палеоширота взята из расчета авторов, которые получили ее из среднего наклонения.

Слишком большие ошибки определения средней палеошироты районов оставляют слишком большой простор для возможных интерпретаций, но все же видно, что эти блоки находились в средней юре примерно в одной и той же полосе

северных тропических широт, причем среднеюрские определения по Кавказу практически не отличаются друг от друга (рис. 6). Для сравнения палеоширотного положения мы воспользовались порталом <https://paleolatitude.org/> (Vaes et al., 2023), где можно построить палеоширотные кривые для любых точек недеформированных плит. В качестве таких точек мы выбрали самые

близкие к району наших исследований — на юге Скифской платформы это район Майкопа (44.5° с.ш., 40.3° в.д.), на северном выступе Аравийской платформы в районе Турайфа (32.1° с.ш., 39.3° в.д.), в качестве референтных полюсов выбрали (Torsvik et al., 2012).

Можно предположить, что в байосе, когда началась субдукция Мезотетиса под южный

Таблица 2. Палеошироты среднеюрских пород Кавказа и Понтид

Table 2. Paleolatitudes of the Middle Jurassic rocks of the Caucasus and Pontides

№№ на рис. 1	район	возраст	N	тесты	$\varphi \pm \Delta\varphi$	Источник
Мегазона Большого Кавказа						
1, 2, 3	СЗ Кавказ	J ₂ a-b	3	F, R	19 +/- 13	эта работа
4, 5	Грузия	J ₂ b	3	F	26 +/- 3	Асанидзе, Печерский, 1979
Понтидо-Закавказская мегазона						
6, 7	Армения	J ₂ b-bt	2	F, R	22 +/- 13	Нгуен и др., 1979
8, 9	Турция	J _{1p} -J ₂ bt	2	F	30 +/- 28	Mualla Cengiz Çinku, 2011
Анатолидо-Армянская мегазона						
10	Азербайджан	J _{1p} -t	1	F, R, C	20 +/- 6	Баженов и др., 1991

Примечание. N — число использованных полюсов, φ_m и $\Delta\varphi$ — палеоширота и ошибка ее определения, F, R, C — положительные тесты складки, обращения и конгломератов.

Notes. N — number of poles, φ_m and $\Delta\varphi$ — paleolatitude and its error, F, R, C — positive fold, reversal and conglomerates tests.

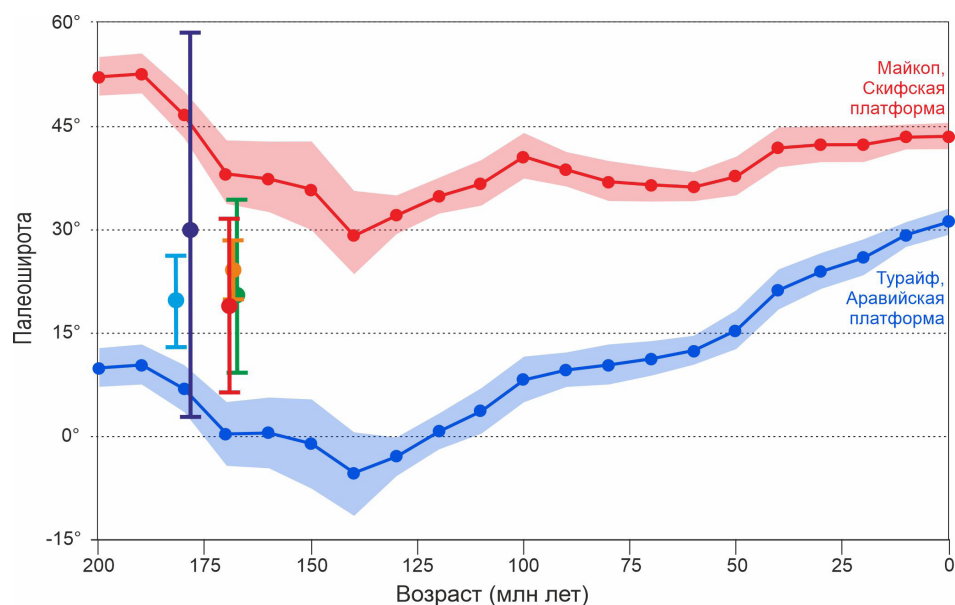


Рис. 6. Сравнение палеоширотных положений районов исследований средней юры (табл. 2) с палеоширотами краев Аравийской (синий цвет) и Скифской (красный цвет) платформ. Голубой цвет — Армянский массив (Баженов и др., 1991), темно-синий цвет — Восточные Понтиды (Mualla Cengiz Çinku, 2011), красный цвет — СЗ Кавказ (эта работа), оранжевый цвет — Грузия (Асанидзе, Печерский, 1979), зеленый цвет — Малый Кавказ (Нгуен и др., 1979).

Fig. 6. Comparison of paleolatitudes of the Middle Jurassic study areas (Table 2) with the paleolatitudes of the margins of the Arabian (blue color) and Scythian (red color) platforms. Light blue color is the Armenian Massif (Bazhenov et al., 1991), dark blue color is the Eastern Pontides (Mualla Cengiz Çinku, 2011), red color is the NW Caucasus (this work), orange color is Georgia (Asanidze, Pechersky, 1979), and green color is the Lesser Caucasus (Nguyen et al., 1979).

край Лавразии (Большой..., 2007), эти тектонические блоки отделили задуговый бассейн. Используя подход (DeBiche, Watson, 1995), можно оценить ширину этого бассейна, сравнив одновременные полюсы — наш и полюс стабильной Европы для 170 млн лет (Torsvik et al., 2012). Широтное расхождение этих двух блоков (т.е. ширина бассейна) превышало 1500 км (25+/-12°), относительное вращение составило 12° (12+/-18°).

Отмеченная во всех исследованных нами точках метакронная намагниченность связана, на наш взгляд, с процессами альпийского орогенеза, происходившими после эоцена. Эоценом заканчиваются главные фазы деформации в ранне-среднеюрском структурном этаже и отмечаются процессы вторичной переработки, выраженные кливажированием, нарушениями К/Аг изотопной системы и др. процессами (Буякайте и др., 2003; Тучкова, 2011), наша метакронная компонента намагниченности имеет послескладчатый возраст и близка к современным направлениям магнитного поля.

ВЫВОДЫ

Получено первое палеомагнитное определение по среднеюрским вулканогенно-осадочным породам СЗ Кавказа, первичность выделенных компонент остаточной намагниченности подтверждена двумя положительными тестами — складки и обращения.

Наши данные говорят, что тектонический блок (террейн) «СЗ Кавказа» в средней юре находился далеко от края Лавразии, ширина северной ветви Тетиса (Мезотетиса) составляла не менее 1500 км, возможно, это была ширина задугового бассейна Понтидо-Закавказского пояса. Анализ имеющихся литературных данных показал, что террейны, принадлежащие мегазонам Большого Кавказа, Понтидо-Закавказской и Анатолидо-Армянской, в средней юре находились примерно в одной и той же полосе тропических широт северного полушария.

В среднеюрских породах СЗ Кавказа широко проявлены процессы вторичного перемагничивания, связанные, вероятно, с альпийским орогенезом постэоценового возраста.

Главным инициатором этой работы был Валентин Семенович Буртман (11.10.1931–01.11.2023), великолепный знаток Средиземноморского подвижного пояса и признанный в мире геолог-тектонист, который написал значимую часть этой статьи. Остальные соавторы, помня этого замечательного человека, довели работу до логического завершения.

Авторы благодарят А.В. Кузьмину за помощь в полевых и лабораторных исследованиях,

А.В. Маринина за любезно предоставленную геологическую схему СЗ Кавказа. Работа выполнена в рамках Госбюджетных тем ГИН РАН № FMMG-2023-0007 и FMMG-2023-0008.

Список литературы [References]

- Асанидзе Б.З., Печерский Д.М.* Результаты палеомагнитного изучения юрских пород Грузии и Северного Кавказа // Известия АН СССР. Физика Земли. 1979. № 10. С. 77–92 [*Asanidze B.Z., Pechersky D.M.* Rezul'taty' paleomagnitnogo izucheniya yurskikh porod Gruzii i Severnogo Kavkaza // Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli. 1979. Iss. 10. P. 77–92 (in Russian)].
- Баженов М.Л., Шипунов С.В.* Метод складки в палеомагнетизме // Известия АН СССР. Физика Земли. 1988. № 7. 89–101 [*Bazhenov M.L., Shipunov S.V.* Metod skladki v paleomagnetizme // Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli. 1988. Iss. 7. P. 89–101 (in Russian)].
- Баженов М.Л., Буртман В.С., Цыганова И.В.* К реконструкции мезозойского Тетиса на Кавказе // Геотектоника. 1991. № 1. 48–58 [*Bazhenov M.L., Burtman V.S., Tsyganova I.V.* K rekonstrukcii mezozojskogo Tetisa na Kavkaze // Geotektonika. 1991. Iss. 1. P. 48–58 (in Russian)].
- Большой Кавказ в альпийскую эпоху / Под ред. Ю.Г. Леонова. М.: ГЕОС. 2007. 368 с. [Bol'shoj Kavkaz v al'pijskuyu e'poxu. Edited by Yu.G. Leonov. Moscow: GEOS. 2007. 368 p. (in Russian)].
- Буякайте М.И., Гаврилов Ю.О., Герцев Д.О. и др.* К-Аг и Rb-Sr изотопные системы пород юрского терригенного комплекса Большого Кавказа // Литология и полезные ископаемые. 2003. № 6. С. 613–621 [*Buyakaite M.I., Gavrilov Yu.O., Gertsev D.O. et al.* The K-Ag and Rb-Sr isotopic systems in rocks from the jurassic terrigenous complex of the Greater Caucasus // Lithology and mineral resources. 2003. V. 38. Iss. 6. P. 613–621].
- Герасимов В.Ю., Ульянов А.А., Снежко В.А. и др.* Циркометрия юрских базальтов Гойтской вулканической области Западного Кавказа // Вестник Московского Университета. Сер. 4. Геология. 2022. № 1. С. 35–41. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2022-1-35-41> [*Gerasimov V.Yu., Ulyanov A.A., Snezhko V.A. et al.* Zircon isotope dating of jurassic basalts from the Goitkh volcanic region of the Western Caucasus // Moscow University Geology Bulletin. 2022. V. 77. Iss. 2. P. 191–197. <https://doi.org/0.3103/S014587522202003X>].
- Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А. и др.* Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. 312 с. [*Goncharov G.I., Komissarova R.A., Pisarevsky S.A. et al.* Paleomagnetology. Leningrad: Nedra, 1982. 312 p. (in Russian)].
- Лаврищев В.А., Пруцкий Н.И., Семенов В.Н. и др.* Геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Изд. 2-ое. Серия Кавказская. Лист К-37-V. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ. 2002. 213 с. [*Lavrishchev V.A., Prutsky N.I., Semenov V.N. et al.* Geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1:200 000. Izd. 2-oe. Seriya Kavkazskaya. List K-37-V. Ob'`yasnitel' naya zapiska. SPb.: VSEGEI. 2002. 213 p. (in Russian)].

- Маринин А.В.* Особенности тектонического строения Северской и Псекупской ступеней (Северо-Западный Кавказ) // Бюллетень МОИП. отдел геологический. 2003. № 2. С. 22–24 [*Marinin A.V.* Osobennosti tektonicheskogo stroeniya Severskoj i Psekupskoj stupenej (Severo-Zapadny'j Kavkaz) // Vyulleten' MOIP. Otdel geologicheskij. 2003. Iss. 2. P. 22–24 (in Russian)].
- Маринин А.В., Расцветаев Л.М.* Структурные парагенезы Северо-Западного Кавказа // Проблемы тектонофизики. М.: ИФЗ. 2008. С. 191–224 [*Marinin A.V., Rastsvetaev L.M.* Strukturny'e paragenezy Severo-Zapadnogo Kavkaza // Problemy tektonofiziki. Moscow: IFZ. 2008. P. 191–224 (in Russian)].
- Нгуен Т., Печерский Д.М., Асанидзе Б.З.* Палеомагнитные исследования юрских пород Армении // Известия АН СССР. Физика Земли. 1979. № 6. С. 71–86 [*Nguyen T., Pechersky D.M., Asanidze B.Z.* Paleomagnitny'e issledovaniya yurskix porod Armenii // Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli. 1979. Iss. 6. P. 71–86 (in Russian)].
- Печерский Д.М., Нгуен Т.* Палеомагнетизм вулканитов офиолитовых серий и поздне меловых эффузивов Армении // Известия АН СССР. Физика Земли. 1978. № 3. С. 48–63 [*Pechersky D.M., Nguyen T.* Paleomagnetizm vulkanitov ofiolitovy'x serij i pozdne melovy'x e'ffuzivov Armenii // Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli. 1978. Iss. 3. P. 48–63 (in Russian)].
- Тучкова М.И.* Терригенные породы древних континентальных окраин (Большой Кавказ и Северо-Восток России). М.: LAP, 2011. 365 с. (Тр. ГИН РАН. Вып. 600). [*Tuchkova M.I.* Terrigenous rocks of ancient continental margins (The Greater Caucasus and the North-East of Russia). Moscow: LAP. 2011. 365 p. (Tr. GIN RAN. Issue 600) (in Russian)].
- Шипунов С.В.* Статистика палеомагнитных данных. М.: ГЕОС, 2000. 80 с. (Тр. ГИН РАН. Вып. 527). [*Shipunov S.V.* Statistika paleomagnitny'x dannyx. Moscow: GEOS. 2000. 80 p. (Tr. GIN RAN. Issue 527) (in Russian)].
- Alken P., Thébault E., Beggan C.D. et al.* International geomagnetic reference field: The thirteenth generation // *Earth Planets Space*. 2021. V. 73. Iss. 1. P. 1–25. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>
- Bazhenov M., Burtman V., Levashova N.* Lower and Middle Jurassic paleomagnetic results from the south Lesser Caucasus and the evolution of the Mesozoic Tethys ocean // *Earth and Planetary Science Letters*. 1996. V. 141. P. 76–89.
- Burtman V.S.* Meso-Tethyan oceanic sutures and their deformation // *Tectonophysics*. 1994. V. 234. Iss. 4. P. 305–327. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90230-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90230-5)
- Day R., Fuller M., Schmidt V.A.* Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1977. V. 13. Iss. 4. P. 260–267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X)
- Debieche M.G., Watson G.S.* Confidence limits and bias correction for estimating angles between directions with applications to paleomagnetism // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. Iss. B12. P. 24405–24429. <https://doi.org/10.1029/92JB01318>
- Dercourt J., Zonenshain L.P., Ricou L.-E., Kazmin V.G.* Geological evolution of the Tethys belt from Atlantic to Pamirs since Liassic // *Tectonophysics*. 1986. V. 123. Iss. 1–4. P. 241–315. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(86\)90199-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(86)90199-X)
- Dunlop D.J.* Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc): 2. Application to data for rocks, sediments, and soils // *Journal of Geophysical Research*. 2002. V. 107. Iss. B3. <https://doi.org/10.1029/2001JB000487.2057>
- Enkin R.J.* A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data // *Pacific Geosciences Centre, Geological Survey of Canada*. 1994. 16 p.
- Enkin R.J.* The direction-correction tilt test: an all-purpose tilt/fold test for paleomagnetic studies // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. V. 212. Iss. 1. P. 151–166. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00238-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00238-3)
- Halls H.C.* A least-square method to find a remanence direction from converging remagnetization circles // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1976. V. 45. Iss. 2. P. 297–304. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1976.tb00327.x>
- Hassig M., Rolland Y., Sosson M. et al.* Linking the NE Anatolian and Lesser Caucasus ophiolites: evidence for large-scale obduction of oceanic crust and implications for the formation of the Lesser Caucasus-Pontides Arc // *Geodinamica Acta*. 2013. V. 26. Iss. 3–4. P. 311–330. <https://doi.org/10.1080/09853111.2013.877236>
- Kazmin V.G., Tikhonova N.F.* Evolution of Early Mesozoic back-arc basins in the Black Sea-Caucasus segment of a Tethian active margin. In: *Tectonic development of the Eastern Mediterranean* // *Geological Society London Special Publications*. 2006. V. 260. Iss. 1. P. 179–200. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2006.260.01.08>
- Kirschvink J.L.* The Least-Square Line and Plane and the Analysis of Paleomagnetic Data // *Geophysical Journal International*. 1980. V. 62. Iss. 3. P. 699–718. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x>
- Maffione M., Hinsbergen D.J.J.* Reconstructing plate boundaries in the Jurassic Neo-Tethys from the East and West Vardar ophiolites // *Tectonics*. 2018. V. 37. Iss. 3. P. 1–30. <https://doi.org/10.1002/2017TC004790>
- McFadden P.L., McElhinny M.W.* The combined analysis of remagnetization and direct observation in paleomagnetism // *Earth and Planetary Science Letters*. 1988. V. 87. Iss. 1–2. P. 161–172. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90072-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90072-6)
- McFadden P.L., McElhinny M.W.* Classification of reversal test in paleomagnetism // *Geophysics Journal International*. 1990. V. 103. Iss. 2. P. 725–729. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb05683.x>
- Mualla Cengiz Çinku.* Paleogeographic evidence on the Jurassic tectonic history of the Pontides: new paleomagnetic data from the Sakarya continent and Eastern Pontides // *International Journal of Earth Sciences*. 2011. V. 100. Iss. 7. P. 1633–1645. <https://doi.org/10.1007/s00531-010-0569-3>
- Pisarevsky S.A., Li Z.X., Tetley M.G. et al.* An updated internet-based Global Paleomagnetic Database // *Earth Science Reviews*. 2022. V. 235. 104258. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104258>

- Rolland Y.* Caucasus collisional history: Review of data from East Anatolia to West Iran // *Gondwana Research*. 2017. V. 49. Iss. 3. P. 130–146. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.05.005>
- Sengor A.M.C., Yilmaz Y.* Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach // *Tectonophysics*. 1981. V. 75. Iss. 3–4. P. 181–241. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90275-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90275-4)
- Stampeli G.M., Kozur H.W.* Europe from the Variscan to the Alpine cycles. *European Lithosphere Dynamics // Geological Society London Memoirs*. 2006. V. 32. Iss. 1. P. 57–82. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.04>
- Tarling D.H., Hrouda F.* The magnetic anisotropy of rocks. London: Chapman & Hall. 1993. 217 p.
- Tauxe L.* Essentials of paleomagnetism. Berkeley, USA: University of California Press. 2010. 512 p.
- Torsvik T.H., Van der Voo R., Ulla Preeden et al.* Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics // *Earth-Science Reviews*. 2012. V. 114. Iss. 3–4. P. 325–368. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.007>
- Vaes B., van Hinsbergen D.J.J., van de Lagemaat S.H.A. et al.* A global apparent polar wander path for the last 320 Ma calculated from site-level paleomagnetic data // *Earth-Science Reviews*. 2023. V. 245. 104547. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104547>
- Van der Voo R.* The reliability of paleomagnetic data // *Tectonophysics*. 1990. V. 184. Iss. 1. P. 1–9. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90116-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90116-P)
- Yakovlev F., Sim L., Marinin A.* Tectonic paleostress fields and deformation state of nappe: comparison of theoretical models with natural data for elucidation of the formation mechanisms, example of Vorontsovsky overthrust (North-West Caucasus) // *Geophysical Research Abstracts*. 2007. V. 9. 09726. SRef-ID: <https://doi.org/1607-7962/gra/EGU2007-A-09726>
- Zijderveld J.D.A.* «A.C. demagnetization of rocks: Analysis of results» / *Methods in paleomagnetism*. Ed. by D.W. Collinson, K.M. Creer, S. Runkorn. 1967. Amsterdam: Elsevier. P. 254–286.

NORTHERN BRANCH OF THE TETHYS OCEAN IN THE MIDDLE JURASSIC: PALEOMAGNETIC CONSTRAINTS ON THE PALEOTECTONIC RECONSTRUCTION

V.Yu. Vodovozov^{1,2}, A.V. Dvorova¹, V.S. Burtman¹, N.V. Salnaia¹, S.V. Rudko¹

¹*Geological Institute of RAS, Moscow, Russia, 119017; e-mail: vodo7474@yandex.ru*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, 119234*

Received December 18, 2024; revised April 22, 2025; accepted June 25, 2025

We present the first paleomagnetic results of the Middle Jurassic volcanogenic-sedimentary rocks of the NW Caucasus – the Chatalapa Formation (Aalenian-Bajocian), the Mount Indyuk Formation (Aalenian), and the Porphyrites series (Bajocian) belonging to the Greater Caucasus tectonic megazone. The purpose of our work was to determine the paleolatitude position in the Middle Jurassic of the NW Caucasus tectonic block and to estimate the width of the northern branch of the Tethys paleocean. As a result of paleomagnetic analysis, we identified a pre-folding bipolar component of natural remanent magnetization, mean direction for all three formations: $D=18.8^\circ$ $I=34.1^\circ$ $k=114.2$ $\alpha_{95}=11.6^\circ$. By averaging the virtual geomagnetic poles of the formations, the paleomagnetic pole of Bajocian for the NW Caucasus was calculated ($Plat=60.1^\circ$, $Plong=181.5^\circ$ $A_{95}=12.8^\circ$). According to this result, the tectonic block was located in the Bajocian at tropical latitudes of the northern hemisphere ($19 \pm 13^\circ$). All the studied rocks exhibited extensive remagnetization processes, probably corresponding to the post-Eocene Alpine orogeny. With the help of the obtained data and some published paleomagnetic poles for the Middle Jurassic rocks of the Caucasus and Turkey, the width of the northern branch of the Tethys Ocean is estimated; according to these data, it was not less than 1500 km.

Keywords: Greater Caucasus, paleomagnetism, paleotectonic reconstructions, Tethys paleocean, Middle Jurassic.