

УДК 550.3

СИСТЕМАТИКА ПАЛЕОМАГНИТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ РАННЕГО-СРЕДНЕГО ДЕВОНА МИНУСИНСКИХ ВПАДИН: НОВЫЕ ДАННЫЕ И СТАРЫЕ ПРОБЛЕМЫ

© 2019 г. А. В. Шацлло, В. Э. Павлов

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

E-mail: shatsillo@gmail.com

Поступила в редакцию 29.12.2017 г.

Принята в печать 28.05.2018 г.

Представлены результаты палеомагнитных исследований многочисленных разрезов вулканитов ранне-среднедевонского возраста Минусинского прогиба (юг Сибири). Анализ этих данных определенно указывает на то, что геомагнитное поле в девоне имело специфический характер, отличный как от современного, так и от поля более древних геологических эпох и было крайне переменчивым (гиперактивным). Аномалии в палеомагнитной записи раннего-среднего девона не являются локальными, присущими какому-то конкретному региону, а имеют глобальный масштаб. Синтез полученных результатов с палеомагнитными данными по близкородственным вулканитам Шотландии показывает, что в течение относительно короткого интервала времени (10–20 млн лет) геомагнитный полюс многократно менял свою позицию, существенно отклоняясь от оси вращения Земли вплоть до (палео)экватора, принимая некоторые квазистабильные положения. Приводится аргументация того, что особенности палеомагнитной записи девонского времени могут являться следствием ощутимого вклада экваториального диполя в главное геомагнитное поле.

Ключевые слова: девон, палеомагнетизм, экваториальный геомагнитный диполь, аксиальный геомагнитный диполь, Сибирская платформа, истинное смещение полюса

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019397-116>

ВВЕДЕНИЕ

Проблема палеомагнетизма девона имеет давнюю историю и была обозначена еще на «заре» палеомагнитных исследований К. Криром при изучении нижнедевонской вулканогенно-осадочной формации Old Red Sandstone (ORS) Британских каледонид [Creer, Embleton, 1967 и ссылки в этой работе]. Первоначально суть этой проблемы сводилась к наличию двух значимо различающихся палеомагнитных направлений, зафиксированных в породах ORS. Данные направления, получившие в литературе наименования DI и DII [Creer, Embleton, 1967], фиксировались в одних и тех же разрезах и давали существенно различающиеся палеошироты. Близкая ситуация была выявлена отечественными исследователями на европейской части территории бывшего СССР [Палеомагнетизм палеозоя, 1974]. В результате дискуссии относительно природы DI- и DII-направлений была сформирована точка зрения, разделявшаяся большинством

исследователей, согласно которой направление DI стало рассматриваться как результат позднепалеозойского перемагничивания, поскольку, с одной стороны, палеомагнитный полюс, соответствующий этому направлению, был близок к полюсам карбона-перми, а, с другой, направление DII лучше согласовалось с палеоклиматической зональностью для девона Восточно-Европейской платформы [Creer, 1968; Палеомагнетизм палеозоя, 1974]. В то же время, при изучении ORS были выявлены и другие квазистабильные палеомагнитные направления, периодически повторяющиеся в разрезах, которые интерпретировались как переходные зоны по отношению к направлениям DII прямой и обратной полярности [Sallomy, Piper, 1973; Kono, 1979].

Не меньшие проблемы возникли и при палеомагнитном исследовании девонских вулканитов азиатской части СССР (здесь мы не будем специально останавливаться на «старых» результатах,

при получении которых использовались магнитные чистки низкой интенсивности и детальности). В частности, изучение познедевонских – раннекарбонатовых кимберлитов и траппов Сибирской платформы [Krivchinsky et al., 2002; Константинов, Стегницкий, 2012; Орлов, Шаццлло, 2011; Шаццлло и др., 2014; и др.] с очевидностью показало, что спектр палеомагнитных направлений, содержащихся в этих объектах, не исчерпывается направлениями D1 и D2 в терминологии Крира, а содержит значительное количество других «аномальных» направлений (в том числе и систематических), существование которых нельзя объяснить ни локальной тектоникой, ни в рамках гипотезы перемагничивания. Более того, количество «аномальных» и «ожидаемых»¹ девонских палеомагнитных направлений, полученных по данным объектам, оказалось соизмеримым, что недвусмысленно указывает на некоторую специфику геомагнитного поля девонского времени. Аналогичный, по сути, результат был получен по познедевонским лавам Северного Тянь-Шаня [Баженов, Левашова, 2011]: авторы объясняют зафиксированные в палеомагнитной записи аномалии вековыми вариациями геомагнитного поля и, на примере изученных объектов, делают вывод о непостоянстве амплитуды вековых вариаций во времени. Так или иначе, но накопленный к настоящему времени массив палеомагнитных данных по породам девонского возраста дает серьезные основания для предположения о том, что характер поведения геомагнитного поля девонского времени существенно отличается как от современного, так и от других геологических эпох. Изучение «девонского геомагнитного феномена» и разработка соответствующих динамомоделей требуют, в первую очередь, получения новых палеомагнитных данных.

В настоящей работе мы представляем новые палеомагнитные результаты по ранне-среднедевонским объектам Минусинских впадин, их систематику и сопоставление с данными по близкородственным вулканитам Британских каледонид формации ORS.

Дополнительную актуальность данному исследованию придает тот факт, что валидные палеомагнитные данные по раннему – среднему девону Сибирской платформы практически отсутствуют. Получение таковых в рамках проводимых работ позволило бы решить целый

комплекс геодинамических и тектонических вопросов, касающихся палеозойской эволюции структур Северной Евразии.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИИ РАЙОНА РАБОТ И ОБЪЕКТАХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом настоящего исследования были вулканогенные образования раннего-среднего девона, выполняющие основание Минусинских впадин. Согласно имеющимся данным о тектонике региона [Зоненшайн и др., 1990; Берзин и др., 1994] Минусинские впадины заложены на гетерогенном основании южно-сибирских каледонид, представляющих уже с конца ордовика единую с кратонной частью Сибири структуру. Минусинские впадины представляют серию мульды изометричной формы, разобобщенных антиклинальными поднятиями, и включают Южно-Минусинскую, Сыда-Ербинскую, Чебаково-Балахтинскую (Северо-Минусинскую) и Назаровскую впадины (рис. 1). Изученные вулканогенные толщи, характеризуются бимодальным составом (риолиты, дациты, базальты и их туфы) с щелочной спецификой. В пределах Минусинских впадин девонские вулканиты латерально изменчивы как по соотношению кислых и основных разностей и структурно-текстурным особенностям, так и по мощности, что нашло отражение в выделении ряда свит (имирская, тонская, чиланская, хараджульская и др. свиты), объединяемых на большей части региона в быскарскую серию [Геологическая..., 1957; 1959]. Прослой осадочных пород в составе быскарской серии имеют резко подчиненное по отношению к вулканогенным образованиям значение. Толщи быскарской серии залегают на подстилающих разновозрастных образованиях с угловым несогласием, размывом и конгломератами в основании. Мощность быскарской серии в наиболее полных ее разрезах достигает 1.5–2 км. Выше по разрезу согласно и с размывом залегают терригенно-карбонатные пестроцветные толщи, мощностью ~0.5 км, содержащие в своей верхней части (бейская свита) пеллециподы, брахиоподы и мшанки, характерные для верхов живетского яруса среднего девона [Геологическая..., 1957] и эйфельскую – нижнеживетскую флору в основании (толтаковская свита) [Геологическая..., 1959]. Завершают разрез Минусинских впадин красноцветы позднего девона и вулканогенно-осадочные толщи турне и визе, перекрытые, с размывом, угленосными толщами визе – ранней перми.

¹ Исходя из положения соответствующих палеомагнитных полюсов относительно палеозойского участка кривой кажущейся миграции полюса Сибирской платформы.

По вулканитам быскарской серии получен ряд современных геохронологических определений (Ar-Ar и U-Pb методы, сводка в работе [Воронцов и др., 2012]), укладывающихся в интервал $407.5 \pm 0.2 - 386 \pm 4$ млн лет, более молодые датировки получены по секущим вулканитам дайкам (385 ± 4 и 364 ± 5.5 млн лет). Таким образом, имеющиеся геохронологические и палеонтологические данные позволяют ограничить время накопления основного объема быскарских вулканитов эмсом и эйфелем, что охватывает интервал ~ 20 млн лет.

В ходе полевых исследований 2010–2012 гг. в пределах Минусинских впадин нами были опробованы основные разрезы вулканитов быскарской серии (отметим, что отбор образцов

проводился только в тех разрезах, где было возможным установить первичное залегание толщ). Были изучены разрезы юго-запада (по рекам Абакан и Джебаш), востока (р. Туба) и севера (залив Кокса, Красноярское вдхр.) Южно-Минусинской впадины; юга Сыда-Ербинской впадины (Красноярское вдхр., выше поселка Беллык); юго-востока (залив Сисим), севера (Красноярское вдхр., ниже залива Езагаш – разрез «Труба») и центральной части (Красноярское вдхр., в р-не с. Новоселово) Чебаково-Балахтинской впадины (рис. 1). Изученные разрезы представляли фрагменты крыльев крупных складок или моноклинали с выдержанными в объеме каждого разреза элементами залегания. В качестве элементов залегания принимались

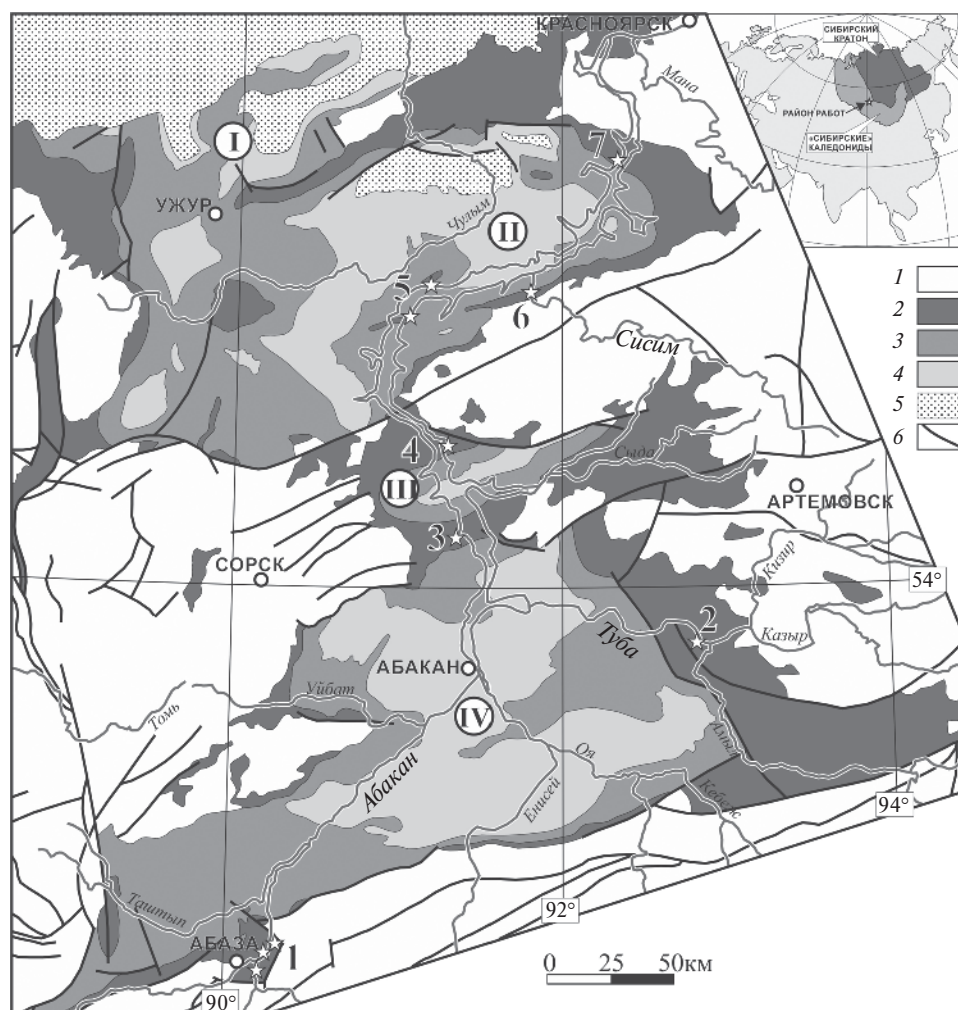


Рис. 1. Схема геологического строения Минусинского прогиба и положение объектов исследования. Составлена на основе Геологической карты СССР м-б 1:2500 000 (ред. Д.В. Наливкин, 1983): 1 – додевонский фундамент; 2 – вулканогенно-осадочные отложения нижнего – среднего девона; 3 – средний – верхний девон; 4 – карбон – нижняя пермь; 5 – юрские и более молодые отложения; 6 – тектонические нарушения. Римские цифры в кружках – впадины Минусинского прогиба: I – Назаровская, II – Чебаково-Балахтинская, III – Сыда-Ербинская, IV – Минусинская. Звездочки и соответствующие им цифры – изученные разрезы: 1 – по рекам Джебаш и Абакан, 2 – Туба, 3 – Кокса, 4 – Беллык, 5 – Новоселово, 6 – Сисим, 7 – «Труба».

падения вышележащих осадочных толщ, редких прослоев осадочных пород внутри вулканитов, а также плоскости магматической отдельности соответствующие границам лавовых покровов. При палеомагнитном опробовании применялась «сайтовая» система отбора образцов, при которой из каждого магматического тела на участке 1–3 м отбиралось по 6–10 ориентированных образцов. В общей сложности было изучено 118 сайтов, представляющих отдельные покровы или субвулканические тела или, в единичных случаях, прослой осадочных пород среди вулканитов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Лабораторная обработка коллекций выполнялась в лабораториях ИФЗ РАН и ГИН РАН. Все образцы были подвергнуты детальной температурной чистке до полного разрушения намагниченности, замеры остаточной намагниченности проводились на спин-магнитометрах JR-4 и JR-6 (AGICO, Чехия). Обработка результатов измерений проводилась с использованием пакета программ Р. Энкина [Enkin, 1994], при кластерном анализе распределения векторов на сфере применялась программа StereoNett v2.46 (Johannes Duyster).

Изученные породы обладают широким спектром магнитных характеристик и компонентным составом намагниченности, различающихся как по разрезам, так, зачастую, и по сайтам в объеме одного разреза, что не позволяет представить все типы диаграмм Зийдервельда в рамках одной статьи. В связи с этим, при дальнейших рассуждениях, основной упор будет сделан на кластерный анализ распределения средних направлений по сайтам на сфере. Для выделенных групп преобладающих направлений (кластеров) будут приведены наиболее представительные диаграммы Зийдервельда.

Средние направления по сайтам рассчитывались, главным образом, по «конечным» высокотемпературным компонентам намагниченности; в ряде случаев, при расчете средних направлений, использовались также и «промежуточные» средне-высокотемпературные компоненты, а также круги перемагничивания, однако только при условии их когерентности с «конечными» компонентами. Прочие низко- и среднетемпературные «промежуточные» компоненты были исключены из рассмотрения.

Поскольку для участков, где интенсивно развита разломно-блоковая тектоника (разрезы по рекам Абакан и Джебаш), мы предполагаем локальные вращения, результаты по этим объектам будут рассмотрены отдельно от остальной части выборки.

Разрезы по рекам Абакан и Джебаш

Разрез по реке Джебаш (правый приток р. Абакан, ~7 км ниже г. Абаза) представляет собой протяженную моноклинал, падающую на СЗ (326° – 335°) под углами от 40° до 53° . В данном разрезе с разных стратиграфических уровней по обоим бортам долины было опробовано 20 удаленных сайтов, расстояние (вкрест простирания) между наиболее удаленными из них составляет ~2 км. В 15 из изученных сайтов удалось выделить компоненты намагниченности (табл. 1, рис. 2). Средние для 9 сайтов джебашского разреза образуют компактную группу, тесты складки (DC, W&E [Enkin, 2003; Watson, Enkin, 1993]) для которой указывают на послескладчатость намагниченности, остальные направления распределены хаотически. Послескладчатая компонента джебашского разреза близка к ожидаемому направлению карбон-пермского перемагничивания ($D=292.1$, $I=-63.5$, пересчитано на координаты района работ), выявленному нами ранее в породах позднего девона и раннего карбона Минусинских впадин [Шацилло и др., 2012] (рис. 2, врезка). В тоже время, разница в склонениях ($\sim 20^{\circ}$) для этих направлений, при близких наклонениях, может указывать на некоторый разворот джебашского блока в послепалеозойское время по часовой стрелке. Направление, выделенное в сайтах 048–2 и 049 (объединены), близко к ожидаемому девонскому направлению региона. Диаграммы Зийдервельда для образцов джебашского разреза, характеризующие послескладчатое и ожидаемое девонское направления представлены на рис. 3. Отметим, что подавляющее число образцов содержащих послескладчатую компоненту намагниченности, характеризуются достаточно шумным сигналом – в процессе размагничивания вектор «блуждает» в области данного направления, а при нагревах выше 580 – 590°C начинает хаотически менять направление.

По р. Абакан было опробовано 11 сайтов на двух удаленных участках (в левом борту долины, ниже устья р. Хараджувль и в правом борту, в ~3 км выше устья р. Бол. Монок) с существенно различающимися элементами залегания. Все опробованные сайты содержат интерпретируемый

Таблица 1. Палеомагнитные направления, содержащиеся в вулканитах разреза р. Джебаш (средние направления по сайтам)

№	site	SLONG	SLAT	<i>n</i>	Dg	Ig	Ds	Is	<i>k</i>	a95	T1	T2
1	045–1	90.216	52.640	4	295.9	–60.9	203.5	–65.7	253.1	5.8	521–580	638–653
2	045–2	90.216	52.640	5	323.1	–30.9	305.5	–68.9	15.4	20.1	400–503	503–580
3	045–3	90.216	52.640	6	305.4	–58.6	206.8	–70.9	137.4	5.7	260–592	503–653
4	045–6	90.216	52.640	5	293.7	–64.2	196.3	–64.1	24.6	15.7	400–576	503–592
5	045–7	90.216	52.640	3	332.6	–69.3	157.6	–70.7	38.7	20.1	400–459	459–576
6	045–8	90.216	52.640	5	315.0	–61.8	190.7	–73.9	36.3	12.9	260–459	576–580
7	045–9	90.216	52.640	3	280.1	–71.9	183.1	–57.5	29.0	23.3	260–482	400–567
8	045–10	90.216	52.640	3	327.5	–68.0	164.0	–71.7	30.0	22.9	400–482	503–576
9	045–11	90.216	52.640	6	135.7	–76.6	149.5	–37.2	53.4	9.3	400–459	521–592
10	048–1	90.210	52.632	6	313.4	–71.2	153.0	–55.2	21.6	14.7	342–459	503–576
11	048–2	90.210	52.632	4	334.3	–60.3	135.9	–66.1	18.9	21.7	400–459	503–580
12	049+048–2	90.212	52.633	7	351.4	11.3	355.0	–33.6	27.8	11.7	260–432	567–653
13	050	90.196	52.642	4	279.3	–45.7	221.7	–52.0	28.2	17.6	432–482	482–580
14	051	90.195	52.643	3	174.4	70.6	319.9	61.5	152.5	10.0	432–521	503–580
15	053	90.195	52.648	4	101.4	7.3	86.5	31.5	20.4	20.8	432–459	567–580
СРЕДНЕЕ для № 1, 3–8, 10, 11				9	311.2	–66.1			80.6	5.8		
							175.9	–68.0	48.1	7.5		

Примечания: № – порядковый номер; site – номер сайта SLONG/SLAT – географическая долгота/широта места отбора; *n* – количество образцов или сайтов, вошедших в статистику; D/I – склонение/наклонение (индексы s/g – стратиграфическая/географическая системы координат); *k* – кучность; a95 – радиус круга доверия, отвечающего вероятности 95%; T1/T2 – начальные/конечные температуры выделения компонент намагниченности.

палеомагнитный сигнал. При анализе средних направлений по сайтам на стереограмме выделяются два кластера² (табл. 2, рис. 2), один из них «I», включающий 4 сайта, определяется тестами складки (DC, W&E) как доскладчатый. Для второго кластера «II», включающего 3 сайта, тесты складки не дают определенного результата, что связано с незначительной разницей в элементах залегания между сайтами. Средние направления по остальным сайтам распределены квазихаотично. Диаграммы Зийдервельда для образцов, характеризующих кластеры «I» и «II», представлены на рис. 3.

² Под кластером мы подразумеваем кучную группу, включающую три и более направления

Как и в случае с послескладчатой компонентой джебашского разреза, среднее направление для доскладчатого «абаканского» кластера «I» совпадает по наклонению с направлением карбон-пермского перемагничивания региона (рис. 2, врезка), однако разница в склонениях предполагает постпермское вращение абаканского блока *против* часовой стрелки (~60°, без учета доверительного интервала). Мы интерпретируем рассмотренные до- и послескладчатые направления джебашского и абаканского разрезов как результат единовременного карбон-пермского перемагничивания, что подразумевает следующую тектоническую историю для изученных участков: 1) деформации джебашского блока; 2) перемагничивание; 3) деформации

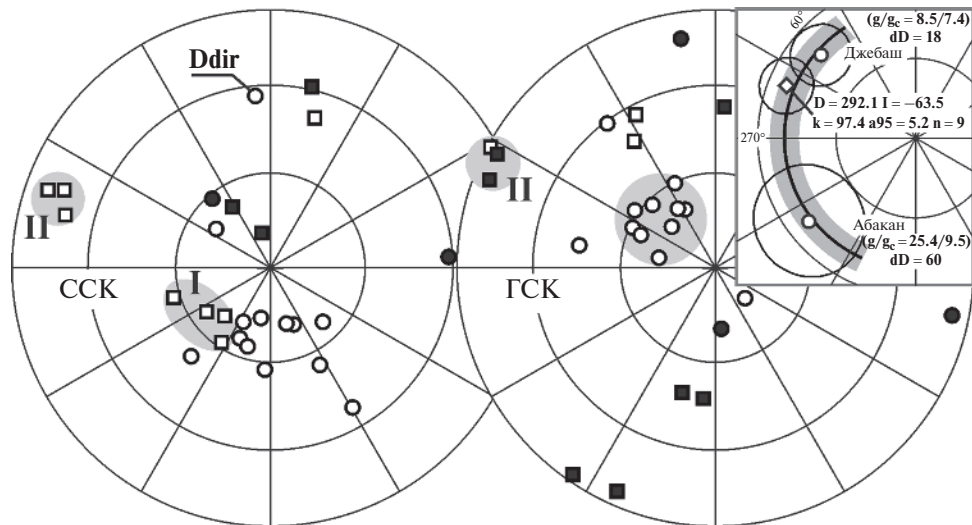


Рис. 2. Распределение средних направлений по сайтам для разрезов по рекам Джебаш (кружочки) и Абакан (квадратики): Области с серой заливкой – группы векторов (кластеры I и II), обсуждаемые в тексте; Ddir- сайт, содержащий ожидаемое девонское направление. Здесь и далее: ГСК/ССК – географическая/стратиграфическая система координат; заливтые значки – проекции на нижнюю полусферу, открытые – на верхнюю.

На врезке: сравнение средних направлений метакорреляционной компоненты намагниченности разрезов Джебаш и Абакан с направлением позднепалеозойского перемагничивания Минусинской впадины [Шацилло и др., 2012]. Ромбик – направление позднепалеозойского перемагничивания для района работ; жирная серая линия – среднее наклонение метакорреляционной компоненты с учетом доверительного интервала, рассчитанное для объединенной выборки по разрезам Джебаш и Абакан. В скобках приведены угловые расстояния (в градусах) между направлениями метакорреляционной компоненты и направлением позднепалеозойского перемагничивания по дуге большого круга (g) и его критическое значение (g_c) и разница склонений (dD). Прочие пояснения в тексте.

Таблица 2. Палеомагнитные направления, содержащиеся в вулканитах разреза р. Абакан (средние направления по сайтам)

№	site	SLONG	SLAT	n	Dg	Ig	Ds	Is	k	a95	T1	T2
1	054–1	90.279	52.732	6	298.2	–1.5	284.4	–19.2	96.1	6.9	432–580	521–592
2	054–2	90.279	52.732	4 + 1 с	297.5	5.3	290.6	–15.9	43.5	12.1	459–538	567–622
3	054–3	90.279	52.732	5	291.2	6.8	289.3	–9.6	40.3	12.2	459–521	503–580
4	055	90.282	52.735	6	203.7	5.9	235.2	–65.5	193.1	4.8	432–459	503–580
5	056	90.281	52.734	4	214.5	3.0	252.7	–57.8	644.0	3.6	260–459	567–592
6	057–1	90.289	52.826	4	332.4	–33.7	223.5	–69.1	12.1	27.5	432–459	521–592
7	057–2	90.289	52.826	4	327.2	–41.4	213.3	–61.6	63.0	11.7	432–459	567–592
8	057–3	90.289	52.826	6	12.7	24.5	16.5	–39.3	14.9	17.9	482–564	580–638
9	058–1	90.297	52.835	5	194.8	48.6	328.2	67.4	467.2	3.5	400–482	604–638
10	058–2	90.297	52.835	6	185.2	47.9	346.5	78.7	171.7	5.1	400–564	638–680
11	059	90.295	52.841	6	3.2	37.6	12.9	29.0	91.3	7.0	400–445	638–680
СРЕДНЕЕ для кластера «I» № 4–7				4	258.2	–30.6			1.6	125.1		
							232.2	–64.3	76.8	10.5		
СРЕДНЕЕ для кластера «II» № 1–3				3	295.6	3.5			191.4	8.9		
							288.1	–14.9	195.4	8.8		

Примечания: Индекс «с» в столбце n – большие круги (размагничивания), использованные при расчете среднего направления по сайту, прочие пояснения см. в табл. 1 и тексте.

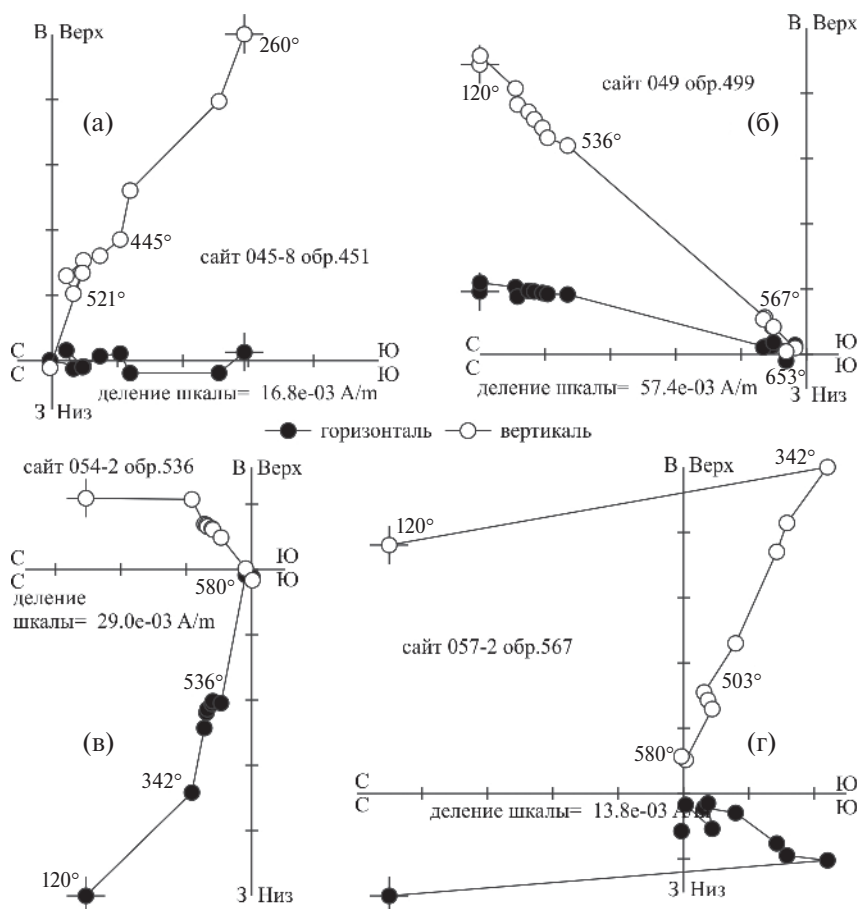


Рис. 3. Примеры терморазмагничивания девонских вулканитов из разрезов по рекам Джебаш (а), (б) и Абакан (в), (г): (а) – послескладчатая компонента; (б) – ожидаемое девонское направление; (в) – доскладчатая компонента кластера «I»; (г) – компонента кластера «II». Диаграммы Зийдервельда приведены в стратиграфической системе координат.

абаканского блока; 4) разнонаправленные вращения джебашского и абаканского блоков. Этот вывод подтверждается тестом складки (NFT) [Шипунов, 1995] для объединенной выборки до- и послескладчатой компоненты, который дает устойчивое решение, указывающее на наличие двух компонент намагниченности, образовавшихся в течение деформаций. Среднее значение наклона, рассчитанное для объединенной выборки метакронной компоненты, в системах координат формирования намагниченности, составляет: $I = -65.1 \pm 2.8$ при $n = 13$, $k = 120.9$. Отметим, что с частичным учетом поправки на вращение для абаканского блока, кластер «II» становится близок к кластеру «NWSE», выявленному по ряду других минусинских объектов, которые будут рассмотрены ниже, тест складки, анализирующий только наклоны [Enkin, Watson, 1996], по объединенной выборке (NWSE + II) указывает на доскладчатость этих направлений.

Систематика палеомагнитных направлений разрезов Туба, Кокса, Беллык, Новоселово, Сисим и Труба

Сепарация палеомагнитных направлений, выделенных в девонских породах этих объектов, вызывает не меньшие затруднения – при удовлетворительном группировании направлений в объемах сайтов межсайтовый разброс, даже в пределах отдельно взятого разреза, оказывается значительным (рис. 4, табл. 3). В отличие от объектов юго-запада Минусы (разрезы *Абакан* и *Джебаш*), рассматриваемые участки обладают относительно «спокойной» тектоникой, что позволяет рассматривать данные по этим участкам совместно. Отметим, что в объеме отдельно взятого разреза элементы залегания толщи очень близки, что не позволяют адекватно выполнить тест складки в объеме разреза, поэтому такие данные в статье не приводятся. Анализ всей совокупности направлений по сайтам,

Таблица 3. Палеомагнитные направления, содержащиеся в вулканитах и осадочных прослоях разрезов Туба, Кокса, Беллык, Новоселово, Сисим и Труба (средние направления по сайтам)

№	Cross-section	cluster	site	SLONG	SLAT	<i>n</i>	Dg	Ig	Ds	Is	<i>k</i>	a95	T1	T2
1	Туба	NWSE	028	92.821	53.831	10	315.7	-2.9	317.0	-2.2	419.3	2.4	400-590	685-700
2		NWSE	029	92.824	53.830	10	314.8	7.8	310.3	10.5	80.3	5.4	450-640	685-700
3		NWSE	030	92.797	53.853	10	318.1	27.6	310.7	10.5	203.7	3.4	400-620	695-700
4	Кокса (юг)	S	004	91.411	54.183	2 + 1 c	147.2	48.4	148.0	32.4	194.0	10.4	440-665	590-710
5		type-I NW	005	91.411	54.183	5 + 1 c	157.5	-19.6	158.5	-35.5	113.7	6.4	590-665	710
6		N	006 sed	91.411	54.183	4	341.9	-41.2	340.1	-25.5	17.5	22.6	380-620	710
7		SW	007	91.411	54.183	5	225.6	-35.9	237.7	-38.5	53.2	10.6	380-650	700-710
8		SW	008	91.411	54.183	4 + 3 c	228.1	-22.4	235.1	-25.0	23.3	13.3	520-650	690-710
9		SW	009	91.410	54.185	5 + 1 c	237.3	-37.0	249.3	-36.3	53.2	9.4	380-680	700-710
10		P	010	91.409	54.188	4	339.3	59.5	347.6	75.2	40.8	14.6	380-680	620-710
11		P	011	91.409	54.188	6	337.6	60.3	344.6	76.1	37.6	11.1	480-690	680-710
12		NW	012 sed	91.409	54.188	6	314.1	38.0	307.0	49.2	48.0	9.8	480-590	710
13		S	013	91.407	54.190	6	180.4	16.4	179.1	2.4	317.4	3.8	380-620	710
14	Кокса (север)	N	070-1	91.398	54.208	6	1.2	-22.3	353.7	-37.6	71.7	8.0	350-560	685-700
15		N	070-2	91.398	54.208	6	9.7	-21.2	3.7	-38.4	476.3	3.1	400-490	685-695
16		N	070-3	91.398	54.208	6	3.5	-18.9	357.3	-34.9	72.7	7.9	300-530	660-700
17		N	070-4	91.398	54.208	5	9.1	-12.8	5.1	-30.0	118.2	7.1	490-560	685-695
18		N	070-5	91.398	54.208	5	2.5	-14.9	357.2	-30.7	92.9	8.0	450-620	685-695
19		P	070-6	91.398	54.208	6	226.1	63.9	249.1	83.1	298.2	3.9	530-640	685-695
20		S	070-7	91.398	54.208	6	196.0	23.8	190.5	42.0	105.4	6.6	350-620	685-695
21	Беллык	N	017	91.298	54.479	5 + 5 c	317.3	-42.4	319.1	-25.2	54.0	6.8	585-690	653-710
22		N	018 sed	91.296	54.480	6	336.5	-73.6	334.9	-58.6	104.2	6.6	120-604	400-653
23		S	019	91.296	54.481	6	176.5	43.8	172.4	29.8	83.8	7.4	400-513	585-653
24		S	020	91.294	54.480	1 + 3 c	182.3	39.1	177.9	25.7	55.0	17.0	342	564
25		S	021	91.294	54.480	6	163.3	45.2	161.4	30.4	49.3	9.6	513-585	653
26		S	022	91.287	54.486	6	202.7	79.8	173.2	67.1	164.4	5.2	342-513	540-653
27		S	023	91.286	54.486	5	154.2	39.9	154.0	24.9	58.6	10.1	400-540	585-653
28		NWSE	024	91.223	54.508	5	316.1	-12.0	316.5	2.4	33.6	13.4	400-513	540-638

Таблица 3 (продолжение)

№	CROSS-section	cluster	site	SLONG	SLAT	<i>n</i>	Dg	Ig	Ds	Is	<i>k</i>	a95	T1	T2
29	Новоселово-1	P	001	91.006	54.942	6	150.4	72.9	97.0	81.8	65.5	8.3	250–470	650–700
30		NWSE	002	91.017	54.950	5	306.9	40.7	318.4	8.2	129.3	6.8	400–670	700
31		N	002 sed	91.017	54.950	5 + 5 c	332.2	–1.9	325.2	–39.9	28.2	9.5	540–638	622–680
32		N	003	91.021	54.951	3	338.5	–34.8	328.4	–60.4	87.0	13.3	200–300	400–700
33		S	004	91.024	54.953	6	197.0	17.2	209.9	49.7	106.6	6.5	470–600	650–700
34		N	005	91.025	54.955	3	336.0	0.7	332.3	–34.5	22.3	26.7	400–440	530–560
35		NW	006	91.024	54.957	5 + 2 c	281.6	58.8	321.2	36.1	24.2	12.8	400–650	560–700
36	Новоселово-2	N	015–1	91.142	54.074	3 + 3 c	306.1	–46.9	318.9	–46.3	91.8	7.5	350–670	530–700
37		N	015–2	91.142	54.074	6	306.3	–45.6	318.5	–45.1	313.0	3.8	250–300	530–700
38		E	016	91.168	54.076	7	117.4	–42.0	108.2	–57.2	29.2	11.4	300–600	580–700
39		E	017	91.163	54.074	6	98.0	–29.9	89.1	–41.7	28.6	12.7	350–630	670–685
40		E	018	91.164	54.074	5	107.2	–23.5	101.4	–37.3	23.3	16.2	470	560–630
41		E	019	91.166	54.075	5	119.0	–18.5	115.8	–34.2	39.5	12.3	470–530	580–700
42	Сисим	type-I E	039	91.811	55.036	4	275.5	38.5	293.0	28.1	35.2	15.7	540–638	667–692
43		type-I E	040	91.817	55.037	3 + 1 c	264.9	25.3	277.1	21.3	133.2	8.5	445–638	653–680
44		type-I E	041	91.817	55.039	6	244.3	27.3	260.6	32.6	277.0	4.0	342–604	653–692
45		P	043	91.812	55.045	4	190.3	66.5	301.5	81.3	28.1	17.6	513–638	653–680
46		type-I	044	91.813	55.048	5	87.6	0.0	87.1	2.1	64.1	9.6	513–604	638–692
47		N	045	91.820	55.052	6	10.3	–17.0	16.0	–43.3	19.7	15.5	445	680–692
48		NW	049	91.846	55.068	2 + 4 c	303.9	66.8	319.7	41.9	103.7	7.4	400–482	585
49		NW	050	91.844	55.068	6	283.9	67.7	310.4	45.9	262.8	4.1	260–482	513–585
50		S	052	91.844	55.071	6	143.2	42.9	140.0	61.8	61.5	8.6	400–513	585–692
51		type-I	053	91.844	55.072	6	30.6	7.4	29.8	–1.8	286.7	4.0	342–513	564–653
52		N	054	91.837	55.077	1 + 5 c	359.1	–33.3	8.7	–49.0	33.4	13.9	564	692
53	N	057	91.839	55.076	5 + 1 c	317.6	–47.8	309.8	–66.1	83.9	7.5	260–482	513–653	

Таблица 3 (окончание)

№	cross-section	cluster	site	SLONG	SLAT	<i>n</i>	Dg	Ig	Ds	Is	<i>k</i>	a95	T1	T2
54	Труба	S	030	92.354	55.483	5	153.0	51.1	167.5	39.8	71.6	9.1	400–622	638–653
55		S	031	92.365	55.487	6	170.7	46.3	179.6	31.8	90.5	7.1	445	653
56		S	032	92.370	55.491	6	162.6	43.9	172.4	31.0	84.4	7.3	445–564	653
57		S	033	92.380	55.493	6	185.3	40.4	190.0	24.0	73.7	7.9	445–513	653
58		S	033–2	92.380	55.493	6	186.4	48.3	192.3	31.6	121.1	6.1	445–564	653
59		S	033–3	92.380	55.493	6	172.0	38.4	178.6	23.9	252.5	4.2	400	653
60		S	033–4	92.380	55.493	5	174.3	45.0	182.1	29.9	129.9	6.7	400–445	585–653
61		S	034	92.382	55.494	6	175.0	48.3	183.5	33.1	419.2	3.3	400–445	653
62		NWSE	035	92.413	55.519	3 + 3 c	128.4	8.3	130.7	5.9	39.4	11.6	445–513	564–653
63		S	036	92.414	55.520	3 + 3 c	166.5	55.9	179.6	41.8	17.0	17.8	445–540	638
64		S	039	92.416	55.522	6	128.4	51.6	148.5	46.4	17.7	16.4	120–482	513–540
65		S	040	92.418	55.524	5	141.7	46.7	156.5	38.3	12.8	22.2	400	540–585
66		S	041	92.418	55.524	4	132.7	66.6	164.2	58.2	16.1	23.6	120–445	540
67		S	073	92.360	55.484	6	164.3	40.7	172.8	27.5	140.6	5.7	241–482	482–680
68	S	074	92.418	55.524	5	194.0	80.3	190.1	38.4	31.0	14.0	400–513	540–680	

Примечание: Cross-section – названия разрезов, cluster – кластер к которому принадлежит направление соответствующего сайта. В столбце «site» индекс «sed» – данные по осадочным породам. Для направлений «туре-I» («случайные» направления) в столбце «cluster» принадлежность к соответствующему кластеру определялась при «повторной» интерпретации (см. раздел «Синтез данных...»). Прочие пояснения см. в табл.1, табл. 2 и в тексте.

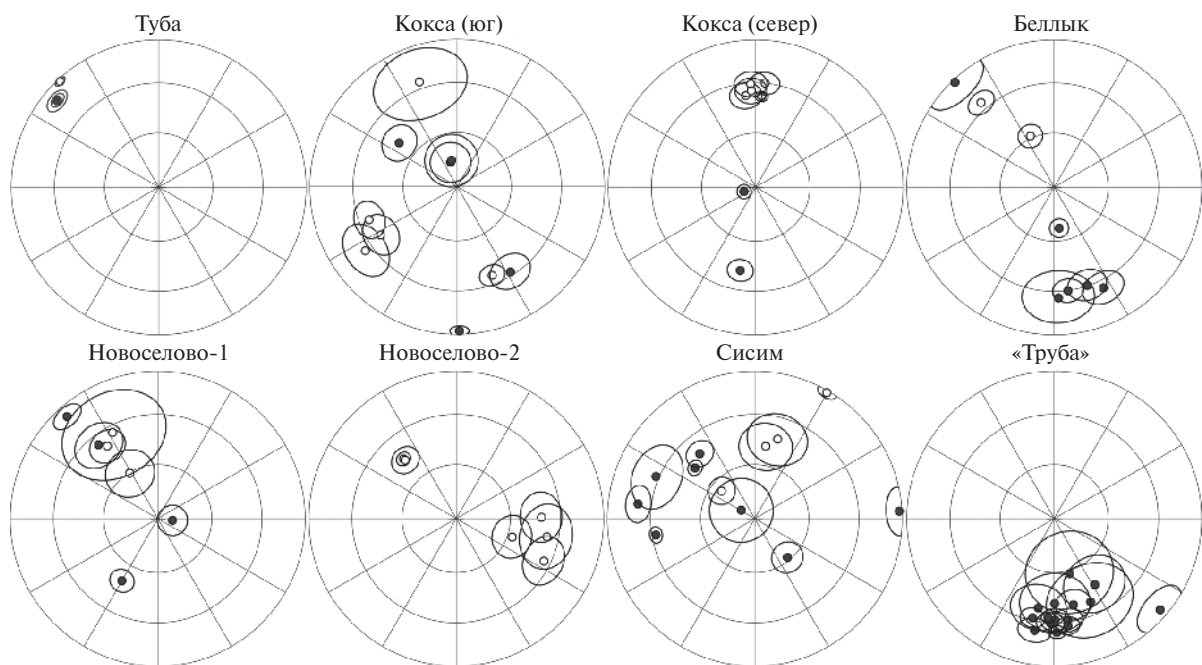


Рис. 4. Распределение палеомагнитных направлений по сайтам для разрезов Туба, Кокса, Беллык, Новоселово, Сисим и Труба. Все стереограммы приведены в стратиграфической системе координат. Прочие пояснения см. на рис. 2.

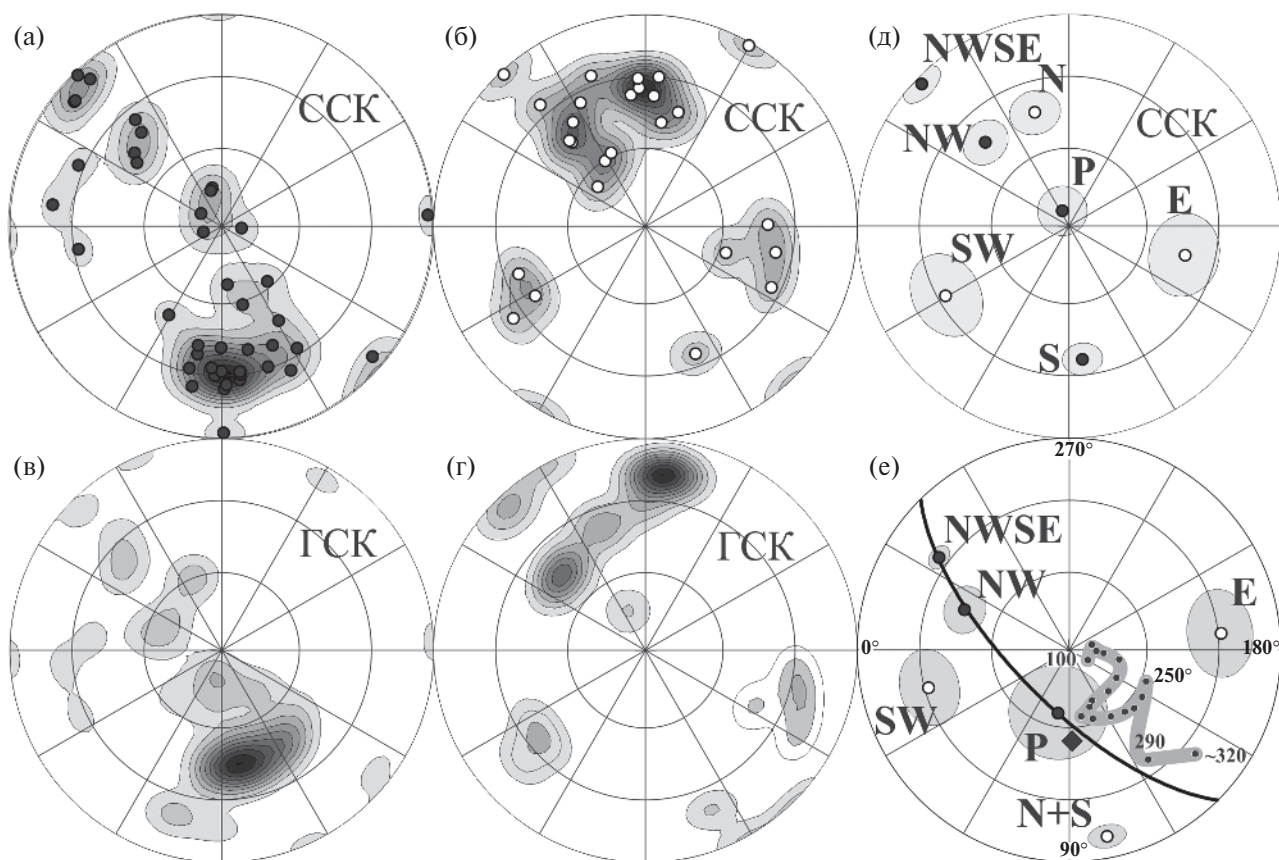


Рис. 5. Кластерный анализ направлений по сайтам (а)–(г), осредненные палеомагнитные направления по кластерам (д) и палеомагнитные полюсы для кластеров (е) по девонским породам из разрезов Туба, Кокса, Беллык, Новоселово, Сисим и Труба: (а) и (в) – плотность распределения направлений по сайтам с положительными наклонениями (нижняя полусфера); (б) и (г) – плотность распределения направлений по сайтам с отрицательными наклонениями (верхняя полусфера). На рис. (е): залитые/открытые значки – северное/южное полушарие; черная линия – большой круг, проведенный через полюсы для кластеров «Р», «NW», «NWSE»; ромбик – положение района работ; жирная серая линия и соответствующие ей цифры – кривая кажущейся миграции полюса стабильной Европы для интервала 250–100 млн лет [Torsvik, Cocks, 2005] в комбинации с известными позднепалеозойскими полюсами Сибири [Шацилло и др., 2012; 2014]. Прочие пояснения на рис. 2 и в тексте.

позволяет выделить ряд в той или иной степени статистически обоснованных кластеров (рис. 5д, табл. 4).

Часть направлений вовсе не образует каких-либо групп и распределена на сфере (в первом приближении) хаотически. Эти направления, которые мы условно относим к типу «I», зафиксированы, главным образом, в разрезе залива Сисим, представляющем собой моноклиаль, а также в разрезе Кокса (юг), представляющем южное крыло крупной антиклинали. Общий вклад направлений I-типа по отношению ко всей выборке составляет ~9%.

К типу «II» мы относим направления, которые повторяются только в объеме одного разреза. В этот тип попадают кластеры «E» и «SW»,

охарактеризованные направлениями из разреза Новоселово-2, представляющем собой северо-восточное крыло крупной антиклинали, и направлением из разреза Кокса (юг), соответственно. Тип «II» включает ~10% направлений от общей выборки.

Наконец к третьему типу «III» мы относим группы направлений, систематически повторяющиеся в удаленных разрезах. К этому типу относятся кластеры «N» (~24%), «NW» (~6%), «NWSE» (~9%), «P» (~7%) и «S» (~35%). Как видно из рис. 5а–5г рассмотренные кластеры обособляются в стратиграфической системе координат, при рассмотрении в географической системе координат кластеры «расплываются», при этом каких-либо дополнительных групп направлений не образуется. Здесь необходимо

Таблица 4. Средние палеомагнитные направления и полюсы по кластерам, зафиксированные в девонских породах разрезов Туба, Кокса, Беллык, Новоселово, Сисим и Труба

type	cluster	n	Dg	Ig	Ds	Is	k	a95	FT (DC)	PLong	PLat	k	A95
II	SW	3	230.2	-31.9	240.5	-33.4	71.3	14.7	x	15.0	-31.8	90.5	13.0
	E	4	110.8	-28.5	104.2	-42.9	40.0	14.7	x	186.3	-28.7	40.5	14.6
III	NWSE	6	313.5	8.6			14.4	18.3	+				
					313.9	3.9	105.9	6.5		324.6	25.5	250.4	4.2
	P	5	268.1	82.3			8.7	27.4	+				
					336.4	83.7	65.3	9.5		79.8	65.3	17.9	18.6
	NW	4	298.6	58.7			24.8	18.8	+				
					315.0	43.4	115.3	8.6		339.0	46.0	113.9	8.6
S	24	168.9	47.3			16.6	7.5	?					
				174.2	36.8	19.3	6.9						
N	16	345.8	-31.3			9.1	13.0	+					
				343.3	-43.3	17.5	9.1						
СРЕДННЕЕ N+S	40	167.5	41.1			11.5	7.0	?					
				170.1	39.5	17.7	5.5		101.5	-11.1	16.5	5.7	

Примечания: Туре – тип палеомагнитного направления по его встречаемости в разрезах: II – направления повторяющиеся только в одном разрезе, III – направления встречающиеся в удаленных разрезах; n – количество сайтов; FT (DC) – результат теста складки «Direction-Correction» [Enkin, 2003] («x» – тест не применим, из за отсутствия вариаций в элементах залегания, «?» – неопределенный результат, «+» намагниченность доскладчатая); PLong/PLat – долгота/широта палеомагнитного полюса; A95 – радиус круга доверия отвечающего вероятности 95%. Полюсы рассчитаны для координат 54.6° с.ш., 91.7° в.д. Прочие пояснения см. в табл. 1 и тексте.

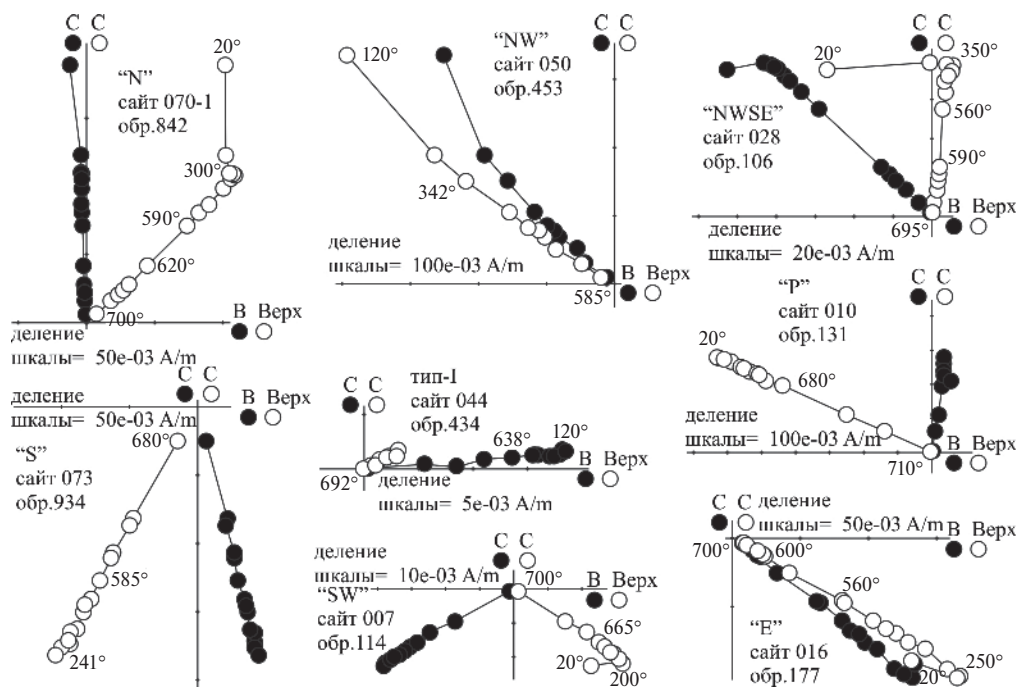


Рис. 6. Примеры терморазмагничивания девонских вулканитов, характеризующие кластеры, выделенные по разрезам Туба, Кокса, Беллык, Новоселово, Сисим и Труба. Диаграммы Зийдервельда приведены в стратиграфической системе координат.

отметить, что все выделенные направления отличаются от известных постдевонских направлений Сибири, исключение здесь составляет кластер «Р», находящийся в некоторой близости (с учетом доверительного интервала) от ожидаемых направлений юры (рис. 5е). Тест складки (DC) указывает на доскладчатость намагниченности для всех кластеров, за исключением кластера «S», где тест не дает определенного результата. Диаграммы Зийдервельда, характеризующие все описанные направления, представлены на рис. 6.

Естественным представляется вопрос – что может означать наблюдаемый характер палеомагнитной записи в изученных девонских породах? На данной стадии палеомагнитного анализа мы можем дать следующие гипотетические предположения.

Вероятно, наиболее простым объяснением для направлений типов «I» и «II» может быть предположение, что данные несистематические направления могут являться результатом записи магнитного поля в процессе инверсии или экскурса, либо, что касается направлений типа «I», некоторой нерегулярной смесью разнонаправленных и разновозрастных компонент. «Тотально» распространенные направления «S» и «N» близкантиподальны и успешно проходят тест обращения ($\gamma/\gamma_c = 10.5/11.0$). Именно эти направления близки к ожидаемым девонским направлениям Сибири и интерпретируются нами как собственно девонские, то есть отражающие положение оси вращения Земли в девонское время. Наиболее «загадочными» представляются систематические аномальные (для девона) направления III-го типа, соответствующие кластерам «NW», «NWSE» и «P». И если направление «P», формально, может рассматриваться как результат доскладчатого юрского перемагничивания³, а «NW» слабо статистически обосновано (зафиксировано только в четырех сайтах), то направление «NWSE», учитывая результаты по разрезам р. Абакан, едва ли может рассматриваться как артефакт. Сосуществование направления «NWSE» с направлениями «S» и «N» должно предполагать проявление некоторых

квазистабильных неосесимметричных состояний поля, повторявшихся во времени и зафиксированных в этом направлении.

В распределении аномальных направлений III-типа (NW, NWSE и P) можно усмотреть некоторую систематику – полюсы, рассчитанные по этим направлениям, идеально ложатся на дугу большого круга, проходящую также через средние координаты района работ (рис. 5е). Такая закономерность, в случае если девонские направления (S и N) также вписывались бы в эту систему, могла бы указывать на то, что аномальные направления являются результатом значительного и меняющегося во времени вклада зональных недипольных (квадру- и октопольных) компонент в главное геомагнитное поле, искажающих наклонения. Однако, в действительности, эта модель не подтверждается и ожидаемые девонские направления (S и N), равно как и направления II-типа (E и SW), в данную систему не вписываются. Другим возможным объяснением наблюдаемого соотношения направлений «NW», «NWSE» и «P» может быть предположение, что направление «NW» является суперпозицией аномального первичного направления «NWSE» и доскладчатого метакронного направления «P», имеющего мезозойский возраст. Однако такая модель требует допущения, что контаминация направления «NWSE» направлением «P» была одинаковой в удаленных разрезах, что представляется маловероятным.

Так или иначе, но полученные данные указывают на то, что около половины изученного временного интервала (по соотношению «ожидаемых» девонских и прочих направлений) занимали экскурсионно-инверсионные или какие-то другие динамо-процессы, при которых геомагнитный полюс существенно отклонялся от поля центрального осевого диполя. В силу проблем региональной корреляции изученных разрезов выяснить характер соотношения выделенных направлений в общей стратиграфической последовательности не представляется возможным, однако данные в объеме отдельно взятого разреза указывают скорее на то, что смена этих направлений происходит сложным, возможно, не систематическим образом (табл. 5). Надо также отметить, что в изученных разрезах имеются пропуски, поскольку некоторые покровы были не пригодны для отбора (разрушались), а отдельные участки береговых обнажений были недоступны.

³ Наличие деформированных толщ нижней-средней юры в пределах Чебаково-Балахтинской впадины согласуется с этим предположением [Беззубцев и др., 2000], однако известно, что основные посткаледонские складчато-деформационные события в пределах Центрально-Азиатского складчатого пояса произошли в позднем палеозое [Зоненшайн и др., 1990; Берзин и др., 1994]

Таблица 5. Соотношение палеомагнитных направлений, выделенных в девонских породах разрезов Туба, Кокса, Беллык, Новоселово, Сисим и Труба в соответствии со стратиграфической последовательностью (кластер/номер сайта). Низ столбца – основание изученного фрагмента разреза. Прочие пояснения см. в табл. 3

Туба	Кокса (юг)	Кокса (север)	Беллык	Новоселово-1	Новоселово-2	Сисим	Труба
NWSE/030	S/013	S/070–7	N/017	NW/006	E/016	N/054	S/030
NWSE/029	NW/012	P/070–6	N/018	N/005	E/019	N/057	S/073
NWSE/028	P/011	N/070–5	S/019	S/004	E/018	type-I/053	S/031
	P/010	N/070–4	S/020	N/003	E/017	S/052	S/032
	SW/009	N/070–3	S/021	N/002 sed	N/015–1	NW/050	S/033
	SW/008	N/070–2	S/022	NWSE/002	N/015–2	NW/049	S/033–2
	SW/007	N/070–1	S/023	P/001		N/045	S/033–3
	N/006		NWSE/024			type-I/044	S/033–4
	type-I NW/005					P/043	S/034
	S/004					type-I E/041	NWSE/035
						type-I E/040	S/036
						type-I E/039	S/039
							S/040
							S/074
							S/041

СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С ДАННЫМИ ПО ФОРМАЦИИ OLD RED SANDSTONES (ORS) БРИТАНСКИХ КАЛЕДОНИД

Как уже отмечалось, «сложности» в палеомагнитной записи девонского времени являются планетарной проблемой. Вероятно, одним из наиболее хорошо изученных в палеомагнитном отношении объектов, близких и по возрасту, и в формационном отношении к разрезам Минусинских впадин, является формация ORS Британских каледонид, значительный объем которой представлен лавовыми толщами. Палеомагнитные аномалии, близкие к минусинским, зафиксированы и в этих объектах. В частности, анализ палеомагнитных данных по формации ORS Британских и Скандинавских каледонид, включающих помимо определений по стратифицированным комплексам также определения по интрузиям и субвулканическим образованиям, позволил Пайперу [Piper, 2007] сделать вывод о существовании девонского эпизода истинного смещения полюса (TPW). По сути, это была попытка объяснения существенных расхождений

близковозрастных девонских определений явлениями глобальной тектоники. Здесь следует отметить, что определения, образующие «девонскую петлю» на кривой кажущейся миграции полюса, отвечающую, по заключению Пайпера, TPW-событию [Piper, 2007], были получены по интрузивным комплексам, то есть по объектам, первичное залегание которых сложно, а часто и невозможно, восстановить. Естественно, что это обстоятельство делает гипотезу Пайпера достаточно уязвимой.

Нами была предпринята попытка более «жесткого» анализа палеомагнитных данных по формации ORS с целью их сопоставления с минусинскими результатами. Как и в случае с минусинскими объектами, был проведен кластерный анализ данных по единичным сайтам для выявления возможных преобладающих направлений. Анализу были подвергнуты определения, полученные исключительно по вулканическим стратифицированным породам, поскольку, с одной стороны, в таких объектах восстановление первичного залегания не вызывает сомнений, с другой стороны, в вулканитах отсутствует эффект занижения наклона, типичный для

осадочных пород. В анализ вошли данные из работ [Sallomy, Piper, 1973; Latham, Briden, 1975; Kono, 1979; Torsvik, 1985] по лавам Midland Valley и Lorne Plateau Шотландии. Другие публикации, посвященные этой тематике, содержат только усредненные определения. Критерием для первичной отбраковки данных были статистические параметры – в итоговую выборку вошли направления, полученные по двум и более образцам, при этом радиус круга доверия был не более 20° , таким требованиям удовлетворили данные по 58 сайтам (лавовым покровам). Возраст лав Midland Valley и Lorne Plateau охватывает интервал 411–394 млн лет [Browne et al., 2002], то есть почти идентичен возрасту вулканитов Минусы.

Результаты кластерного анализа направлений, содержащихся в лавах ORS Шотландии, представлены на рис. 7 и в табл. 6. Как видно (рис. 7а–7в), на фоне общего квазихаотичного распределения направлений на денситограммах выделяются в той или иной степени обоснованные кластеры. Подавляющее количество направлений формируют близкие к антиподальности кластер «NE» и размытый кластер «SW». Сравнение средних направлений по этим кластерам, приведенным к одной полярности, указывает на отсутствие статистически значимых различий между ними ($\gamma/\gamma_c = 10.3/12.3$). Направления NE и SW являются ожидаемым для девона Шотландии, в частности, палеомагнитный полюс,

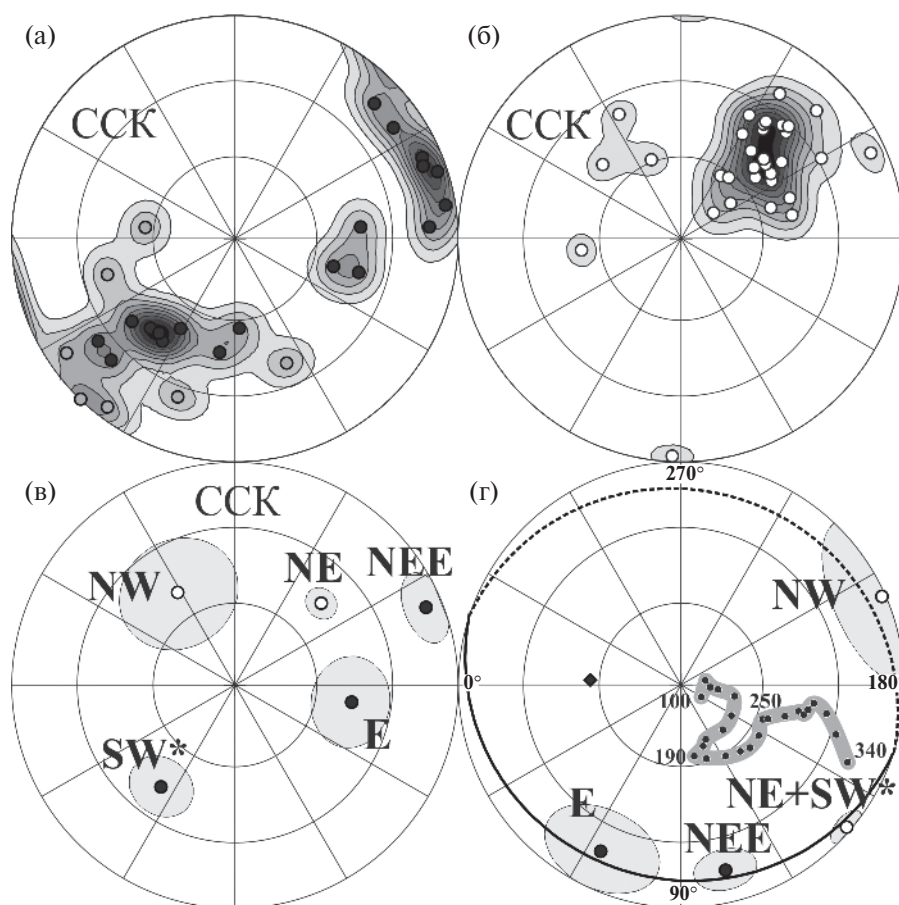


Рис. 7. Кластерный анализ палеомагнитных направлений по сайтам (а), (б), усредненные палеомагнитные направления по кластерам (в) и палеомагнитные полюсы для кластеров (г) для девонских вулканитов формации ORS Шотландии: (а) – плотность распределения направлений по сайтам с положительными наклонениями (нижняя полусфера); (б) – плотность распределения направлений по сайтам с отрицательными наклонениями (верхняя полусфера). На рис. (г) залитые/открытые значки – северное/южное полушарие; черная линия – большой круг, проведенный через полюсы для кластеров; ромбик – географическое положение формации ORS; жирная серая линия и соответствующие ей цифры – кривая кажущейся миграции полюса стабильной Европы для интервала 340–100 млн лет [Torsvik, Cocks, 2005]. Прочие пояснения на рис. 2 и в тексте.

* для расчета среднего направления по кластеру использовались направления по сайтам, попадающие в центр распределения на денситограмме (а).

Таблица 6. Средние палеомагнитные направления и полюсы по кластерам для девонских вулканитов формации ORS Шотландии

cluster	<i>n</i>	Ds	Is	<i>k</i>	a95	PLong	PLat	<i>k</i>	A95	PLong (R)	PLat (R)
E	3	98.4	46.1	64.1	15.5	64.3	18.2	48.1	18.0	21.1	25.0
NE	26	46.6	-45.7	25.3	5.7						
NEE	8	67.9	8.3	30.2	10.2	103.5	15.6	36.2	9.3	60.7	17.5
NW	3	328.3	-49.6	35.4	21.0	203.7	-1.7	30.0	22.9	158.4	-10.2
SW	16	218.6	37.3	8.9	13.1						
SW*	9	216.0	42.9	21.8	11.3						
NE + SW*	35	43.8	-45.1	24.0	5.1	139.3	-2.3	21.8	5.3	93.5	-5.4

Примечания: *для расчета среднего направления по кластеру SW использовались направления по сайтам, попадающие в центр распределения на денситограмме (рис. 7а). Полюсы рассчитаны для координат 56.5° с. ш., 357.0° в. д.; PLong (R)/PLat (R) – долгота и широта палеомагнитного полюса при приведении к «сибирской» системе координат (пояснения см. на рис. 8), прочие пояснения см. в табл.1, табл. 4 и в тексте.

рассчитанный по этим направлениям (табл. 6), статистически не отличается от раннедевонского полюса Подолии (PLong = 145.5; PLat = -3.7; A95 = 6.7) [Smethurst, Khramov, 1992], рассматриваемого в качестве референтного для Восточно-Европейской платформы. Также достаточно уверенно обособляется кластер «NEE» и два слабо статистически обоснованных кластера «NW» и «E». Как и в минусинских объектах в лавах ORS, помимо преобладающих групп, отмечается присутствие отдельных «случайных» направлений, не вписывающихся в общее распределение.

Палеомагнитные полюсы ORS, рассчитанные по всем кластерам, значимо отличаются от известных постдевонских европейских полюсов, то есть, соответствующие направления проблематично объяснить в рамках гипотезы последовонского перемагничивания.

Распределение полюсов ORS по кластерам уверенно аппроксимируется дугой большого круга (рис. 7г), при этом виртуальные геомагнитные полюсы (по сайтам) не образуют направленного тренда в соответствии со стратиграфической последовательностью в разрезах. Сложные возвратно-поступательные перемещения виртуальных геомагнитных полюсов плохо согласуются с гипотезой истинного смещения полюса, привлекаемой [Piper, 2007] для объяснения распределения девонских палеомагнитных направлений Европы.

Результаты проведенного анализа также указывают на то, что палеомагнитные определения для девона, полученные по крупным интрузивным телам [Piper, 2007 и ссылки в этой работе],

остывание которых (в отличие от лавовых потоков) происходило достаточно длительное время, едва ли могут быть пригодны для решения геофизических задач. Это обусловлено тем, что зафиксированные в таких интрузиях палеомагнитные направления *могут* являться суперпозицией нескольких близких по возрасту разнонаправленных компонент намагниченности.

Синтез данных: хаос или закономерность?

Ранее было показано [Шацилло, 2015 а], что палеомагнитные полюсы для ранней перми Сибири и Восточно-Европейской платформы (Балтики) могут быть совмещены путем поворота вокруг полюса Эйлера, располагающегося в пределах акватории Карского моря, что ретроспективно описывает характер взаимодействия кратонов в ходе их пермской консолидации в структуре Евразии. Такой характер взаимодействия Сибири и Балтики хорошо согласуется с рядом специфических позднепалеозойско – раннемезозойских структур в опоясывающих их складчатых областях и не противоречит кинематическим ограничениям в рамках современной плитотектоники.

Анализ новейших палеомагнитных данных по палеозою Сибири и Балтики [Шацилло, 2015б; Шацилло и др., 2017] показал, что данные континентальные блоки могли находиться в «раннепермской» конфигурации уже с силурийского времени, т. е. являлись с силура по начало перми единой литосферной плитой, претерпевшей в течение перми реорганизацию. Таким образом, используя полюс Эйлера, предложенный в работе [Шацилло, 2015а], мы можем привести палеомагнитные полюсы по девону

каледонской Сибири и Европейским каледонидам в их первоначальное взаимное положение в рамках единой плиты. Приведенные таким образом к «сибирским» координатам полюсы ORS представлены в табл. 6 и на рис. 8. Как видно (рис. 8а) в результате такой реконструкции полюсы для ожидаемых девонских направлений (N + S и NE + SW) практически идеально совпали, что и должно следовать из модели [Шацилло, 2015б].

При этом, явной сходимости полюсов, отвечающих аномальным направлениям, не наблюдается. Достичь совмещения возможно для пар полюсов (E и E) и (NWSE и NW), однако только при условии изменения полярности одного из направлений. Такой вариант интерпретации должен быть как-то обоснован, поскольку абсолютное преобладание монополярных направлений в каждом из рассматриваемых регионов, выявленное при кластерном анализе, не дает повода для подобных предположений – необходимо наличие хотя бы единичных антиподальных векторов для каждого кластера в каждом регионе. Для проверки существования таких антиподальных векторов, еще раз вернемся к анализу распределения единичных направлений, отнесенных при выделении генеральных кластеров к «случайным» (рис. 5, рис. 7).

Минусинские объекты. (1) В кластер «NWSE» мы изначально включили единичное направление с ЮВ склонением (сайт 035, разрез Труба), основанием для этого было наличие высокотемпературных конечных и средне-высокотемпературных промежуточных компонент намагниченности, антиподальных друг другу, зафиксированных в образцах этого сайта; аналогичная палеомагнитная запись наблюдалась и в образцах из сайта 029 разреза Туба. (2) Как видно (рис. 5а, 5б, 5д) для кластера «E» мы видим близкоантиподальный «размытый» (и поэтому не вошедший в статистику) кластер ЗСЗ склонений, включающий направления по трем сайтам из разреза Сисим (039, 040 и 041). Расширенный, за счет направлений из разреза Сисим, кластер «E» определяется тестами складки как доскладчатый. (3) Для кластера «NW» также фиксируется близкоантиподальное единичное направление ЮВ склонения.

Для всех аномальных кластеров, выделенных в объектах Шотландии (NEE, NW и E) на стереограммах обнаруживаются антиподальные направления (рис. 7а–7в). Три направления, близкоантиподальные кластеру «NEE», попадают в крайнюю ЮЗ часть распределения для ожидаемого девонского направления «SW» (при расчете общего среднего для SW- и NE-кластеров

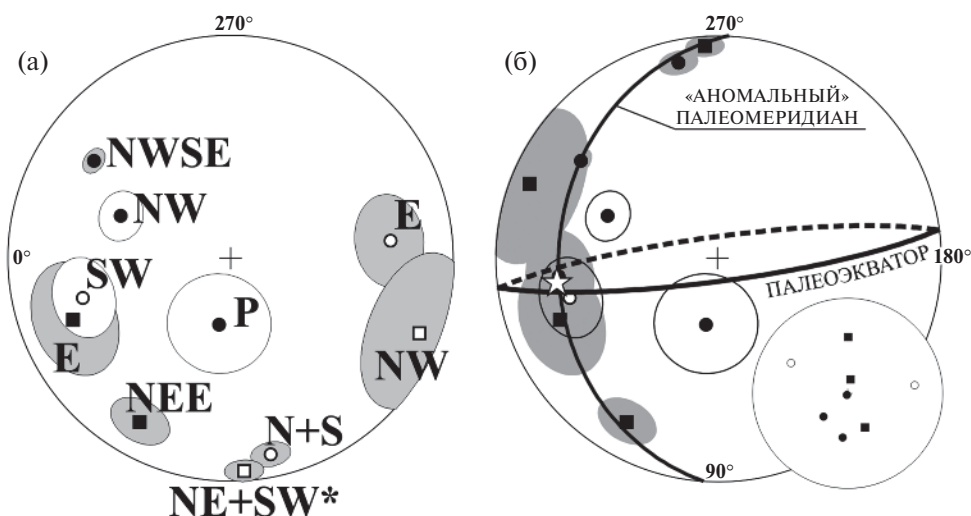


Рис. 8. Сопоставление рассчитанных палеомагнитных (?) полюсов по кластерам для девонских пород Шотландии и Минусинской впадины, приведенных к «сибирской» системе координат: квадратики – полюсы для объектов Шотландии, кружки – полюсы минусинских объектов; залитые значки – северное полушарие, открытые – южное; звездочка – средний полюс по всем аномальным кластерам. Круги доверия, залитые серым – для полюсов по которым построен аппроксимирующий круг (палеомеридиан). На врезке – распределение аномальных полюсов, приведенных к одной полярности и к центру сферы (открытые значки для монополярных кластеров, залитые для биполярных).

Для приведения полюсов Шотландии к «сибирской» системе координат использовался полюс вращения с координатами 79° с. ш., 95° в. д., угол поворота 46° по часовой стрелке (в соответствии с работой [Шацилло, 2015 а]). Прочие пояснения в тексте.

данные направления не учитывались). Кластерам «NW» и «E» антиподальны два единичных направления, имеющие, соответственно, ЮВ и З склонения.

Таким образом, подавляющее большинство направлений, выделенных при кластерном анализе в объектах Минусы и Шотландии, можно рассматривать как биполярные. Исключение здесь составляют кластеры «P» и «SW» Минусы. Далее, для анализа всей совокупности аномальных полюсов приведем их к одной полярности — характер полученного распределения представлен на рис. 8б. Как видно, все биполярные аномальные полюсы достаточно хорошо аппроксимируются дугой большого круга, проходящего через ожидаемые девонские полюсы, то есть лежат на палеомеридиане, который мы назовем «аномальным меридианом». Этот тренд является определяющим в геометрии всего спектра направлений. Наиболее статистически обоснованные аномальные полюсы («NEE» Шотландии и «NWSE» Минусы) располагаются на удалении 45° от пересечения аномального меридиана и палеоэкватора. Остальные биполярные аномальные полюсы лежат ближе к палеоэкватору, находясь между полюсами «NEE» и «NWSE». В положении монополярных аномальных полюсов («P» и «SW» Минусы) также наблюдается некоторая система — они близки (с учетом доверительного интервала) к палеоэкватору и удалены от аномального меридиана на 50° – 60° . Осредненный по всем аномальным направлениям полюс попадает на пересечение палеоэкватора и аномального меридиана. Таким образом, в распределении аномальных полюсов Шотландии и Минусы видна явная симметрия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные по раннему-среднему девону Минусинских впадин палеомагнитные данные показывают, что в девонское время, на протяжении, по крайней мере, 10–20 млн лет, направления геомагнитного поля в регионе характеризовались крайней вариабельностью (гиперактивностью), существенно отличаясь по этому параметру от геомагнитного поля большей части фанерозоя. При этом, на общем фоне быстрых изменений направлений, выделяются также кластеры палеомагнитных направлений (полюсов), отвечающие некоторым квазистабильным состояниям поля. Сравнение полученных результатов с данными, опубликованными ранее по девону Шотландии, показывают, что наблюдаемые особенности палеомагнитной записи

не являются локальными, присущими какому-то конкретному региону, а имеют, вероятно, глобальный масштаб.

Возможно, некоторые аналогии для такого поведения поля мы фиксируем в палеомагнитной записи пограничного венд-кембрийского интервала [Shatsillo et al., 2005 и ссылки в этой работе].

Близость ряда кластеров палеомагнитных полюсов, рассчитанных для юга Сибири и для Шотландии (с учетом тектонических поправок, в соответствии с работой [Шацилло, 2015 б]), свидетельствует в пользу того, что в рассматриваемое время геомагнитное поле сохраняло (хотя бы частично) свою преимущественно дипольную геометрию, при этом ось диполя могла существенно отклоняться от оси вращения Земли.

Положение большей части выделенных кластеров полюсов вдоль большого круга, проходящего через область нахождения «ожидаемого» палеомагнитного полюса девона (т. е., полюса, согласующегося с генеральным трендом сибирской кривой кажущейся миграции полюса) указывает на то, что эти кластеры, отвечающие квазистабильным направлениям поля, располагались вдоль палеомеридиана. Последнее обстоятельство можно рассматривать как указание на существенный вклад экваториального диполя в геомагнитное поле рассматриваемого интервала девонского времени.

Согласно результатам работы [Shcherbakova et al., 2017] этот интервал времени характеризовался также крайне низкой величиной напряженности геомагнитного поля, что является прямым указанием на ослабление осевого диполя по сравнению с полем «обычных» эпох. Такое ослабление осевого диполя, наряду с существованием относительно мощного экваториального диполя, при перемещении вклада обоих диполей в суммарное геомагнитное поле, могло бы объяснить аномальные девонские направления, образующие «облако» полюсов, растянутое вдоль палеомеридиана.

Вклад экваториального диполя мог возрастать по мере уменьшения вклада осевого диполя (например, во время его инверсий), что обуславливало приближение аномальных полюсов к палеоэкватору. Возможность существования относительно мощного и устойчивого экваториального диполя, вклад которого в главное геомагнитное поле палеозоя мог составлять от 5 до 20%, отмечалась ранее в работах [Храмов, 2007; Храмов, Иосифиди, 2012].

Тектоническая интерпретация полученных данных выходит за рамки настоящей статьи, однако здесь мы подчеркнем два пункта:

1) в свете полученных и анализа литературных данных попытки объяснения значительно расхождения девонских полюсов для единого блока явлениями глобальной тектоники (гипотеза истинного смещения полюса) [Piper, 2007] представляются несостоятельными;

2) данные по «ожидаемым» девонским направлениям для Европейской и Азиатской части Евразии поддерживают гипотезу [Шацилло, 2015б; Шацилло и др., 2017] о стабильном взаимном положении Сибири и Балтики в течение среднего-позднего палеозоя.

Необычный (по отношению к большей части фанерозоя) характер геомагнитного поля девонского времени может указывать на существование каких-то особенностей (неоднородностей) на границе ядро–мантия, обусловивших аномальное поведение геодинамики в эту эпоху. Девонский геомагнитный феномен требует дальнейшего изучения и осмысления.

Авторы выражают благодарность И.В. Федюкину (ИФЗ РАН) за помощь, оказанную на всех этапах полевых работ. Полевые работы и лабораторная обработка коллекций были выполнены при финансовой поддержке РФФИ (гранты 16-05-00446 и 17-05-00021) и Министерства науки и образования (договор № 14.Z50.31.0017). Итоговая интерпретация данных и подготовка статьи выполнялись при поддержке гранта РНФ № 161710097.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баженов М.Л., Левашова Н.М.* Амплитуда вековых вариаций направления геомагнитного поля в верхнедевонских вулканитах Северного Тянь-Шаня // *Физика Земли*. 2011. № 12. С. 74–86
- Беззубцев В.В., Махлаев М.Л., Зальцман В.Д.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Новая серия. Лист N-46 (N-47) Абакан/под ред. В.В. Беззубцева, Ю.С. Глухова. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2000.
- Берзин Н.А., Колман Р.Г., Добрецов Н.Л., Зоненшайн Л.П., Сяо Сюань, Чанг Э.З.* Геодинамическая карта западной части Палеоазиатского океана // *Геология и геофизика*. 1994. Т. 35. № 7–8. С. 8–29.
- Воронцов А.А., Федосеев Г.С., Перфилова О.Ю., Травин А.В.* Девонский вулканизм Минусинской котловины: этапы проявления и связь с прогибанием континентальной литосферы (по результатам геохронологических 40 Ar/39 Ar исследований) // *Докл. РАН*. 2012. Т. 447. № 3. С. 308–313.
- Геологическая карта СССР м-ба 1:200000. Серия Минусинская котловина, лист N-46-XIV. Объяснительная записка. Госгеолтехиздат. 1959. С. 96.
- Геологическая карта СССР м-ба 1:200000. Серия Минусинская котловина, лист N-46-IV (Когунек). Объяснительная записка. Госгеолтехиздат. 1957. С. 72.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натанов Л.М.* Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра. 1990. Кн. 1. 326 с. Кн. 2. 334 с.
- Константинов К.М., Стегницкий Ю.Б.* Позднесилурийская–раннедевонская естественная остаточная намагниченность кимберлитов и траппов Якутской алмазодонной провинции // *Докл. РАН*. 2012. Т. 442. № 3. С. 394–400.
- Орлов С.Ю., Шацилло А.В.* Палеомагнитные данные по среднепалеозойским магматическим комплексам в составе аппаинской и эмьяксинской свит Ыгыгатиинской впадины (Сибирская платформа). Палеомагнетизм и магнетизм горных пород. Борок. 2011. С. 146–151.
- Палеомагнетизм палеозоя/А.Н. Храмов, Г.И. Гончаров, Р.А. Комисарова и др. Тр. ВНИГРИ. Вып. 335. Л.: Недра. 1974. 238 с.
- 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., Кузнецов Н.Б., Дронов А.В.* Палеомагнитные данные по Сибири и Балтике в контексте тестирования некоторых геодинамических моделей формирования Центрально-Азиатского подвижного пояса // *Физика Земли*. 2017. № 5. С. 159–172.
- Шацилло А.В.* Взаимодействие Сибири и Балтики на финальном этапе амальгамации Евразийской части Пангеи // *Физика Земли*. 2015. № 2. С. 1–16.
- Шацилло А.В.* Единство Сибири, Арктиды и Балтики в палеозое: гипотеза «протоевразийской» плиты. Тектоника и геодинамика континентальной и океанической литосферы: общие и региональные аспекты. Материалы XLVII Тектонического совещания. Том 2. М.: ГЕОС. 2015 б.С. 277–282.
- Шацилло А.В., Федюкин И.В., Паверман В.И.* Палеомагнетизм позднепалеозойских гранитов Ангаро-Витимского батолита и вмещающих пород Байкало-Патомской складчатой области: тектонические следствия // *Геология и Геофизика*. 2014. Т. 55. № 7. С. 1093–1111.
- Шацилло А.В., Федюкин И.В., Павлов В.Э.* Палеомагнетизм позднего девона – раннего карбона Минусинской впадины и проблема разработки средне-позднепалеозойского сегмента КМП Сибирской платформы. Палеомагнетизм и магнетизм горных пород (теория, практика, эксперимент). Материалы международной школы-семинара «Проблемы палеомагнетизма и магнетизма горных пород». СПб.: СОЛО. 2012. С. 270–277.

- Шуиунов С.В.* Новый тест складки в палеомагнетизме (реабилитация теста выравнивания) // *Физика Земли*. 1995. № 4. С. 67–74.
- Browne M.A.E., Smith R.A., Atken A.M.* Stratigraphical framework for the Devonian (Old Red Sandstone) rocks of Scotland south of a line from Fort William to Aberdeen. British Geological Survey Research Report. 2002. RR/10/04. P. 67.
- Creer K.M.* Palaeozoic palaeomagnetism // *Nature*. 1968. № 219. P. 246–250.
- Creer K.M., Embleton B.J.J.* Devonian palaeomagnetic pole for Europe and N. America // *Nature*. 1967. № 214. P. 42–43.
- Enkin R.J.* A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada. 1994. P. 16.
- Enkin, R.J.* The direction-correction tilt test: an all-purpose tilt/fold test for paleomagnetic studies // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. № 212. P. 151–166.
- Enkin, R.J., Watson G.S.* Statistical analysis of palaeomagnetic inclination data // *Geophys. J. Int.* 1996. V. 126. P. 495–504.
- Kono M.* Palaeomagnetism and palaeointensity studies of Scottish Devonian volcanic rocks // *Geophys. J. R. astr. Soc.* 1979. V. 56. P. 385–396.
- Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Courtillot V. et al.* Palaeomagnetism of East Siberian traps and kimberlites: two new poles and palaeogeographic reconstructions at about 360 and 250 Ma // *Geophys. J. Int.* 2002. V. 148. P. 1–33.
- Latham A.G., Briden J.C.* Palaeomagnetic field directions in Siluro-Devonian lavas of the Lorne Plateau, Scotland, and their regional significance // *Geophys. J. R. astr. Soc.* 1975. V. 43. P. 243–252.
- Piper J.D.A.* Palaeomagnetism of the Loch Doon Granite Complex, Southern Uplands of Scotland: The Late Caledonian palaeomagnetic record and an Early Devonian episode of True Polar Wander // *Tectonophysics*. 2007. № 432. P. 133–157.
- Salomy J.T., Piper J.D.A.* Palaeomagnetic studies in the British Caledonides – IV Lower Devonian lavas of the Strathmore region, Scotland // *Geophys. J. R. astr. Soc.* 1973. V. 34. P. 47–68.
- Shatsillo A.V., Didenko A.N., Pavlov V.E.* Two Competing Paleomagnetic Directions in the Late Vendian: New Data for the SW Region of the Siberian Platform // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2005. V. 7. № 4.
- Shcherbakova V.V., Biggin A.J., Veselovskiy R.V., Shatsillo A.V., Hawkins L.M.A., Shcherbakov V.P., Zhidkov G.V.* Was the Devonian geomagnetic field dipolar or multipolar? Palaeointensity studies of Devonian igneous rocks from the Minusa Basin (Siberia) and the Kola Peninsula dykes, Russia // *Geophysical Journal International*. 2017. V. 209. Is. 2. P. 1265–1286.
- Smethurst M.A., Khramov A.N.* A new Devonian palaeomagnetic pole for the Russian platform and Baltica, and related apparent polar wander // *Geophys. J. Int.* 1992. V. 7. P. 179–192.
- Torsvik T.H., Cocks L.R.M.* Norway in space and time: A Centennial cavalcade // *Norwegian Journal of Geology*. 2005. № 85. P. 73–86.
- Torsvik T.H.* Magnetic properties of the Lower Old Red Sandstone lavas in the Midland Valley, Scotland; palaeomagnetic and tectonic considerations // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1985. V. 39. P. 194–207.
- Watson J.S., Enkin R.J.* The fold test in paleomagnetism as a parameter estimation problem // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. P. 2135–2137.

Systematics of Paleomagnetic Directions from Early–Middle Devonian Rocks of Minusa Troughs: New Data and Old Problems

A. V. Shatsillo^{a,*} and V. E. Pavlov^a

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^{*}*E-mail: shatsillo@gmail.com*

Received December 29, 2017

Paleomagnetic results from numerous Early–Middle Devonian volcanic sequences of the Minusa trough, southern Siberia, are presented. The analysis of these data definitely indicates that the geomagnetic field in the Devonian had a specific character, different from both the present field and the field of more ancient geological epochs, and was extremely variable (hyperactive). The anomalies in the paleomagnetic record of the Early–Middle Devonian are not local, peculiar to a particular region, but have a global occurrence. The synthesis of the obtained results with the paleomagnetic data from the coeval volcanics from Scotland shows that during a relatively short time (10–20 Ma), the geomagnetic pole repeatedly changed its location, significantly deviating from the Earth's rotation axis up to the (paleo)equator and assuming some quasi-stable positions. The arguments suggesting that the specific features of the Devonian palaeomagnetic record could probably be induced by the significant contribution of the equatorial dipole to the main geomagnetic field are presented.

Keywords: the Devonian, paleomagnetism, equatorial geomagnetic dipole, axial geomagnetic dipole, Siberian platform, true polar wander