

ОЦЕНКИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОЗДНЕГО ПАЛЕОЗОЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗУЧЕНИЯ ПЕРМСКИХ ЛАВ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

М.Л. Баженов, Р. Ван дер Во*, Дж.Дж. Меерт, Н.М. Левашова, И.С. Ипатьева**

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

** Earth and Environmental Sciences, University of Michigan, 2534 C.C. Little Building, Ann Arbor, MI, USA*

*** Department of Geological Sciences, University of Florida, Gainesville, FL, Florida, USA*

Одним из наиболее надежных способов получить информацию о характеристиках древнего геомагнитного поля является палеомагнитное изучение мощных лавовых толщ. Однако на сегодня данные такого типа чаще всего имеют возраст менее 5 млн лет, их гораздо меньше для остальной части кайнозоя и всего мезозоя, есть два полноценных результата по докембрийским породам, но их совершенно нет для палеозоя. С целью получить первые оценки характеристик геомагнитного поля в эту эру было проведено исследование толщи позднепермских базальтов и риолитов Северо-Восточного Казахстана. В данной статье представлены предварительные результаты по части коллекции (66 потоков (сайтов)) из разреза мощностью около 1600 м. С помощью ступенчатой чистки во всех сайтах с небольшой погрешностью была выделена характеристическая компонента обратной полярности. Эта компонента имеет доскладчатый возраст и, вероятнее всего, первична. Во всей совокупности данных не найдено ни одного аномального направления намагниченности, а средние направления характеристической компоненты по сайтам хорошо сгруппированы (склонение $D = 243.3^\circ$, наклонение $I = -57.0^\circ$, кучность $k = 79.1$, радиус круга доверия $\alpha_{95} = 2.0^\circ$, 65 сайтов). Сравнение с опубликованными данными по мощным лавовым сериям кайнозоя и мезозоя показывает, что вековые вариации в поздней перми были намного слабее, чем в мезозое и кайнозое, а само геомагнитное поле было менее возмущенным. Еще большее различие обнаружено по отношению к моделям вековых вариаций, построенным на основе позднекайнозойских данных.

Геомагнетизм, палеомагнетизм, палеозой, мощные лавовые толщи, характеристики геомагнитного поля.

LATE PALEOZOIC GEOMAGNETIC-FIELD ESTIMATES FROM PALEOMAGNETIC STUDIES OF PERMIAN LAVAS IN NORTHEASTERN KAZAKHSTAN

M.L. Bazhenov, R. Van der Voo, J.J. Meert, N.M. Levashova, and I.S. Ipat'eva

Paleomagnetic studies of thick lava series are one of the most reliable sources of data on the ancient geomagnetic field. However, most of such data are younger than 5 Ma, with much fewer results on the rest of the Cenozoic and the Mesozoic. Two wholesome results are available for the Precambrian but none for the Paleozoic. Late Permian basalts and rhyolites from northeastern Kazakhstan were studied to obtain first estimates of the geomagnetic-field characteristics during that period. We present preliminary results on part of the collection (66 flows (sites)) from a section ~1600 m thick. The characteristic component of reversed polarity was isolated by stepwise demagnetization at all the sites with a slight error. This component is of pre-folding age and, most likely, primary. No abnormal magnetization direction is observed in the data, and the average directions of the characteristic component at the sites are tightly clustered ($D = 243.3^\circ$; $I = -57.0^\circ$, $k = 79.1$; $\alpha_{95} = 2.0^\circ$; 65 sites). As compared with the published data on Cenozoic and Mesozoic thick lava series, secular variation was much weaker in the Late Permian than in the Mesozoic or Cenozoic, and the geomagnetic field was less disturbed. Secular-variation models based on the Late Cenozoic data show even more dramatic differences.

Geomagnetism, paleomagnetism, Paleozoic, thick lava series, geomagnetic-field characteristics

ВВЕДЕНИЕ

За исключением последних 10—20 тыс. лет, почти все наши знания о геомагнитном поле получены при палеомагнитных исследованиях природных объектов. Решающую роль при этом играет вопрос, как отделить запись геомагнитного сигнала от различных помех и шумов. Очень скоро после начала палеомагнитных исследований стало понятно, что есть два типа «записывающих» устройств: осадочные породы и вулканические образования. Несомненным преимуществом первых является возможность получить длинные записи по разрезам без явных признаков прерывов. Казалось бы, лавовые толщи без

надежно уступают осадкам — ведь прерывистость излияний или внедрений даек самоочевидна, да и с датированием объектов были большие проблемы.

Как обычно, все оказалось сложнее. Были найдены механизмы искажения геомагнитной записи в осадках, прежде всего занижение наклонений. Также было обнаружено, что окончательная фиксация геомагнитного поля происходит не на поверхности осадка, а на глубине до 20 см от нее, причем эта глубина может варьировать во времени, зависеть от состава осадков и т.д. Да и мнение о непрерывности даже внешне наиболее полных осадочных разрезов оказалось преувеличенным, но этот вопрос заслуживает отдельного рассмотрения.

А с вулканитами? Совершенно ясно, что запись в любой толще лав или рое даек прерывиста. Зато до сих пор не найдено никаких повсеместных причин искажения этой записи, а с развитием методов изотопного датирования резко улучшилась точность определения возраста вулканитов. В целом за последние двадцать лет количество и качество исследований вулканитов для изучения характеристик геомагнитного поля заметно растет, чего, кстати, нельзя сказать о работах с осадками. Наиболее надежную информацию о многих характеристиках древнего магнитного поля можно получить по мощным лавовым сериям [Merrill et al., 1996]. В англоязычной литературе такие данные обозначают термином «paleosecular variation for lava, PSVL» (палеоэпохальные вариации в лавах) [Merrill et al., 1996; Johnson et al., 2008], и для них была создана особая база данных. В настоящее время сложился ряд требований к качеству отдельного PSVL результата [Johnson et al., 2008]: 1) все образцы прошли полное ступенчатое размагничивание с последующим компонентным анализом; 2) средние направления (или виртуальные геомагнитные полюсы) по потокам подсчитаны не менее чем по трем независимо отобраным образцам; 3) все потоки и/или дайки отобраны в небольшом районе, в пределах которого тектонические движения маловероятны; 4) для выводов о характеристиках древнего поля каждый PSVL результат должен быть получен не менее чем по 25—30 лавовым потокам и/или дайкам (сайтам), но для решения многих задач надо изучить примерно втрое-вчетверо большее число сайтов.

На сегодня подавляющее большинство PSVL данных имеет возраст менее 5 млн лет, менее 20 результатов получены по остальной части кайнозоя (5—65 млн лет) и около 10 — мезозойского возраста. Долгое время самым древним был результат по сибирским траппам с возрастом около 250 млн лет [Neupertmann et al., 2004], но совсем недавно были опубликованы результаты по позднеархейским (2.8—2.45 млрд лет) [Biggin et al., 2008a] и среднепротерозойским (1.1 млрд лет) породам [Tauxe, Kodama, 2009; Swanson-Hysell et al., 2009]. Также был опубликован первый палеозойский (позднедевонский) PSVL результат, но однозначной оценки характеристик поля получить не удалось [Баженов и Левашова, 2011]. Ясно, что трех результатов на почти 3 млрд лет явно недостаточно для решения большинства задач геомагнетизма.

Такая ситуация связана как с относительной малочисленностью возможных объектов, так и с трудоемкостью исследований. Например, разрезы палеозойских вулканитов Центрально-Азиатского орогенного пояса Евразии часто оказываются полностью перемагниченными, или же первичную компоненту намагниченности удастся выделить в немногих потоках. Так как для одного надежного PSVL результата нужны данные по многим десяткам потоков, начинать такую работу вслепую нецелесообразно. Поэтому приходится проводить исследование в два этапа: на первом изучается большое число объектов для решения других задач, например, тектонических, и только самые перспективные из них выбираются для более детального опробования. В данной статье и представлен первый предварительный PSVL результат по породам пермского возраста.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И ОПРОБОВАНИЕ

Центрально-Азиатский орогенный пояс (ЦАОП) занимает огромные площади в центральной части Евразийского континента. В пределах пояса, в свою очередь, выделяются многочисленные тектонические элементы, в строении которых большую роль играют вулканические породы палеозоя. Возможно, это самая обширная область развития палеозойских вулканических пород в мире.

В западной части ЦАОП на территории Казахстана развиты вулканические породы с возрастными от начала кембрия до начала перми; формирование этих пород связано с формированием ложа древних океанов, с надсубдукционными структурами и в лишь в малой степени — с внутриплитными явлениями. К концу ранней перми закрылись последние океанические бассейны и повсюду завершился надсубдукционный вулканизм [Хаин, 1979; Добрецов, 2011; Коробкин, Буслов, 2011; Левашова и др., 2012]. В поздней перми в Казахстане возникли несколько изолированных ареалов вулканизма, имеющих форму неправильно-округлых впадин размером от нескольких десятков до более чем 100 км, несогласно наложенных на более древние структуры (рис. 1, б). Вулканогенные толщи во впадинах обычно слабо наклонены или слагают пологие складки, и только вблизи разломов наблюдаются более сильные деформации. Среди лав преобладают базальты и андезитобазальты, но в заметных количествах присутствуют и кислые

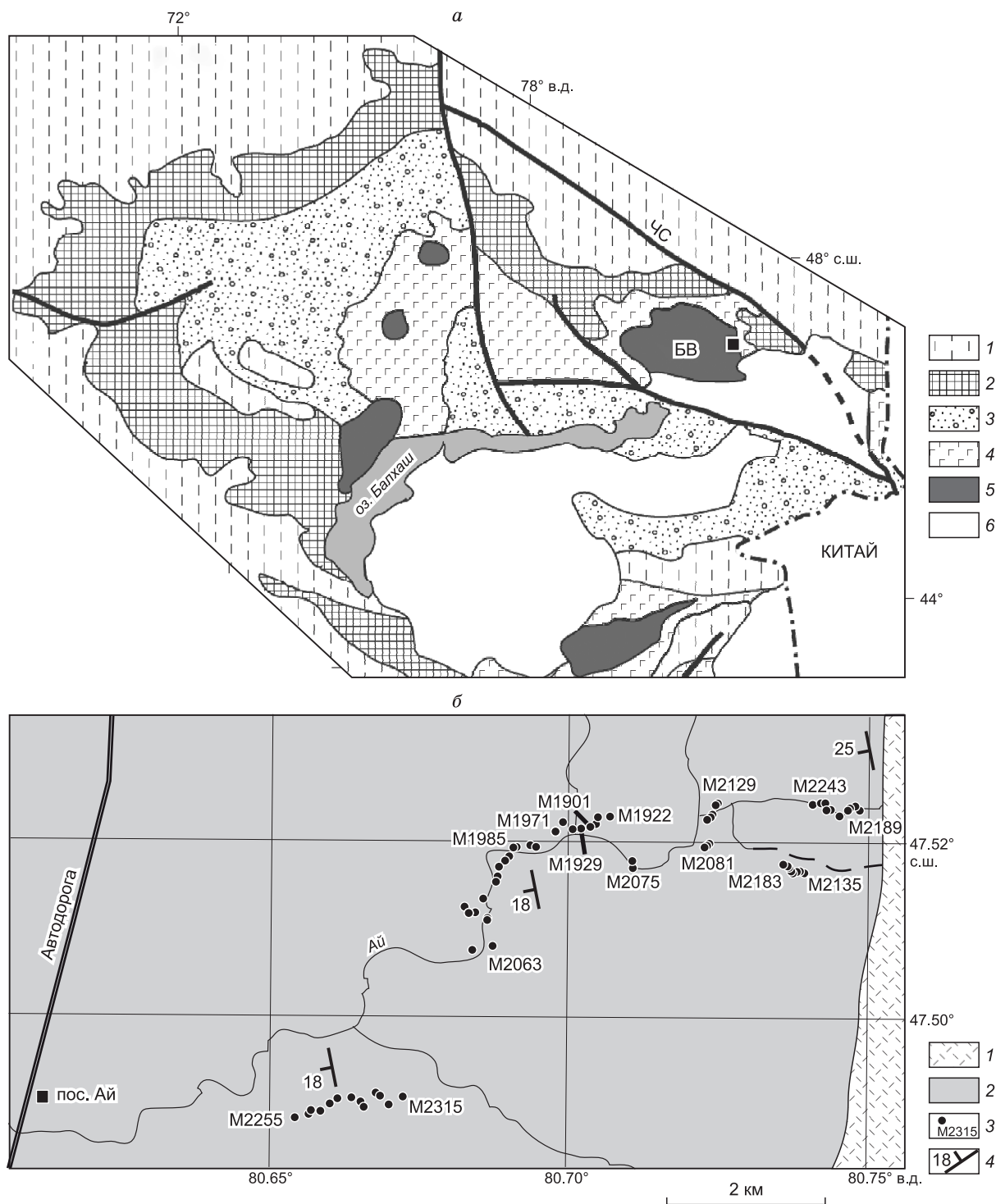


Рис. 1. Тектоническая схема Казахстана (а), схема опробования позднепермских пород восточного борта Баканасской впадины (б).

а: 1 — докембрий и ранний палеозой нерасчлененные, 2 — силурийско-среднедевонские надсубдукционные вулканические комплексы, 3 — среднепалеозойские аккреционные комплексы и флиш, 4 — среднекаменноугольно-раннепермские вулканические комплексы Балхаш-Илийского пояса, 5 — позднепермские вулканические толщи наложенных впадин (БВ — Баканасская впадина), б — мезокайнозойские осадки. Основные разломы показаны жирными линиями; ЧС — Чингизский сдвиг [Самыгин, 1974]. Черный квадрат — рис. 1, б: 1 — позднепермские кислые туфы, 2 — позднепермские базальты с отдельными потоками риолитов, 3 — точки опробования (сайты) с номерами, 4 — элементы залегания.

вулканиты. Вулканизм во впадинах субщелочного типа, и его связывают с растяжением, возникшим после завершения коллизионных и субдукционных процессов в ЦАОП [Тектоника..., 1982; Тевелев, 2003]. Следует однако отметить, что вышеописанная схема тектонической эволюции Центрального и Восточного Казахстана в позднем палеозое почти полностью основана на весьма редких находках флоры и дальнейшей корреляции далеко разнесенных разрезов континентальных вулканитов, что вызывало и вызывает сомнения в ее корректности [Ляпичев и др., 1993]. Стоит обратить внимание и на полное отсутствие изотопных датировок по вулканогенным толщам этого региона.

Баканасская впадина на северо-востоке Казахстана — крупнейшая пермская наложенная структура такого типа (см. рис. 1, *a*). Здесь на позднекаменноугольных-раннепермских кислых вулканитах залегает лавовая толща бакалинской свиты мощностью от 600 до 2600 м — базальты и андезибазальты с несколькими мощными покровами кислых лав; изредка встречаются тонкие невыдержанные по простиранию прослои осадков. Ссылаясь на находки моллюсков и флоры, К.З. Сальменова и В.Я. Кошкин [1990] определяют возраст бакалинской свиты как позднепермский. Однако методом лазерной абляции по 21 зерну первично-магматических цирконов, выделенных из кислых лав одного из покровов, был определен возраст 283.0 ± 2.4 млн лет, что заставляет считать эту толщу раннепермской. Наблюдаемые в пределах Баканасской впадины деформации, чаще пологие моноклинали, обычно связываются с движениями по крупным сдвигам в конце триаса—начале юры [Самыгин, 1974]. Впрочем, возраст завершающей складчатости на большей части Казахстана достаточно спорен и не исключено, что она произошла в конце перми—начале триаса.

Опробованный разрез на востоке впадины имеет мощность более 2000 м и представлен сотнями потоков базальтов и андезибазальтов мощностью первые метры, иногда до 10 м (см. рис. 1, *b*). Кроме них присутствуют несколько потоков кислых лав: два из них имеют мощность несколько десятков метров и еще несколько — несколько метров. Осадочные прослои очень редки, но границы потоков в ряде мест достаточно хорошо выражены для замера залеганий. Кроме того, границы потоков часто маркируются красными окисленными корками, хорошо заметными на фоне серо-черных лав. Почти повсюду наиболее устойчивые потоки образуют систему параллельных гряд и квест, средние простирания которых согласуются прямыми замерами залеганий, а вариации малы. В итоге для введения поправок за наклоны слоев в палеомагнитные данные для большинства сайтов было использовано среднее для нескольких прямых замеров залеганий (азимут падения/угол падения 260/18), и только для самых восточных сайтов падения чуть круче (260/25); такое же залегание имеют слои кислых туфов непосредственно под самыми нижними потоками базальтов.

Ранее этот разрез уже изучался вдоль протяженного профиля (один образец из потока) в попытке найти зоны разной полярности [Levashova et al., 2003]. Основные результаты этой работы состоят в следующем:

- 1) в подавляющем большинстве образцов лав уверенно выделяется единственная сильная высокотемпературная компонента;
- 2) эта компонента всюду имеет обратную полярность, ее направления тесно сгруппированы; аномальных направлений не было найдено;
- 3) эта компонента — доскладчатая, что было продемонстрировано путем сравнения с данными по разрезам из других частей Баканасской впадины;
- 5) палеомагнитный полюс для одного из изученных разрезов согласуется с позднепермским полюсом стабильной Европы, а другой повернут относительно него.

Столь однозначно позитивные палеомагнитные результаты, а также большая мощность, большое число потоков и хорошая обнаженность обусловили пригодность этого разреза для изучения характеристик геомагнитного поля перми. В 2011 г. в пределах единой моноклинали, начиная от контакта базальтов с подстилающими кислыми туфами, было изучено 66 потоков: 64 потока — базальты, а два — кислые лавы. Всего опробован интервал порядка 1600—1700 м (см. рис. 1, *b*). Следует подчеркнуть, что и по условиям обнаженности, и с целью изучить максимальный интервал разреза почти никогда не отбирались соседние потоки; очень приблизительно можно сказать, что число отдельных потоков на изученном интервале в 3—4 раза больше числа изученных. Изученный в 2011 г. интервал примерно вдвое больше опробованного ранее [Levashova et al., 2003]. Надо добавить, что, несмотря на тщательные поиски, не было найдено ни одного «холодного» конгломерата, которые упоминаются другими авторами [Сальменова, Кошкин, 1990]. Удалось, правда, найти несколько горизонтов лавобрекчий, которые, однако, непригодны для палеомагнитного теста галек.

Из одного потока (далее сайт) было взято 6—7 образцов, ориентированных с помощью магнитного компаса. Не было замечено ни одного случая влияния пород на показания компаса. Как дополнительная предосторожность, в каждом сайте авторы старались брать образцы с сильно различными ориентациями; в этом случае, если породы все же влияют на показания компаса, будет наблюдаться очень высокий внутрисайтовый разброс направлений намагниченности. В пределах сайта образцы распре-

лялись вдоль потока на расстояние не меньшее, чем мощность потока для уменьшения возможного влияния движений отдельных блоков при остывании лавы. Для каждого сайта измерялись его координаты, что дало возможность упорядочить их в стратиграфической последовательности (см. рис. 1, б).

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В палеомагнитной лаборатории ГИН РАН один кубический образец из каждого штуфа был подвергнут ступенчатому (до 20 шагов) температурному размагничиванию вплоть до 700 °С в самодельной печи с двухслойным пермаллоевым экраном с остаточным полем около 10 нТ. Намагниченность измерялась на спин-магнитометрах JR-4 и JR-6 (уровень шума 0.05 мА/м), помещенных в кольца Гельмгольца для компенсации внешнего магнитного поля. Результаты прогревов представлялись в виде ортогональных диаграмм [Zijderveld, 1967], и для выделения компонент намагниченности использовались линейные участки траектории, включающие не менее трех измерений [Kirschvink, 1980]. Данные по образцам из одного потока осреднялись [Fisher, 1953], и полученные таким образом средние векторы по сайтам использовались для анализа. Все виды анализа и вычислений сделаны с помощью программы PaleoMac [Cogne, 2003].

При нагреве до 200 °С, редко до 300°, в образцах разрушается нестабильная компонента, амплитуда которой очень сильно варьирует (рис. 2). Для 42 сайтов, в которых эта компонента определена с удовлетворительной точностью, ее среднее направление (склонение $D = 6.5^\circ$, наклонение $I = 66.1^\circ$, радиус круга доверия $\alpha_{0.5} = 3.1^\circ$) статистически незначимо отличается от направления современного дипольного поля ($D = 0^\circ$, $I = 65.4^\circ$). Вероятно, эта низкотемпературная компонента имеет вязкую природу и недавний возраст.

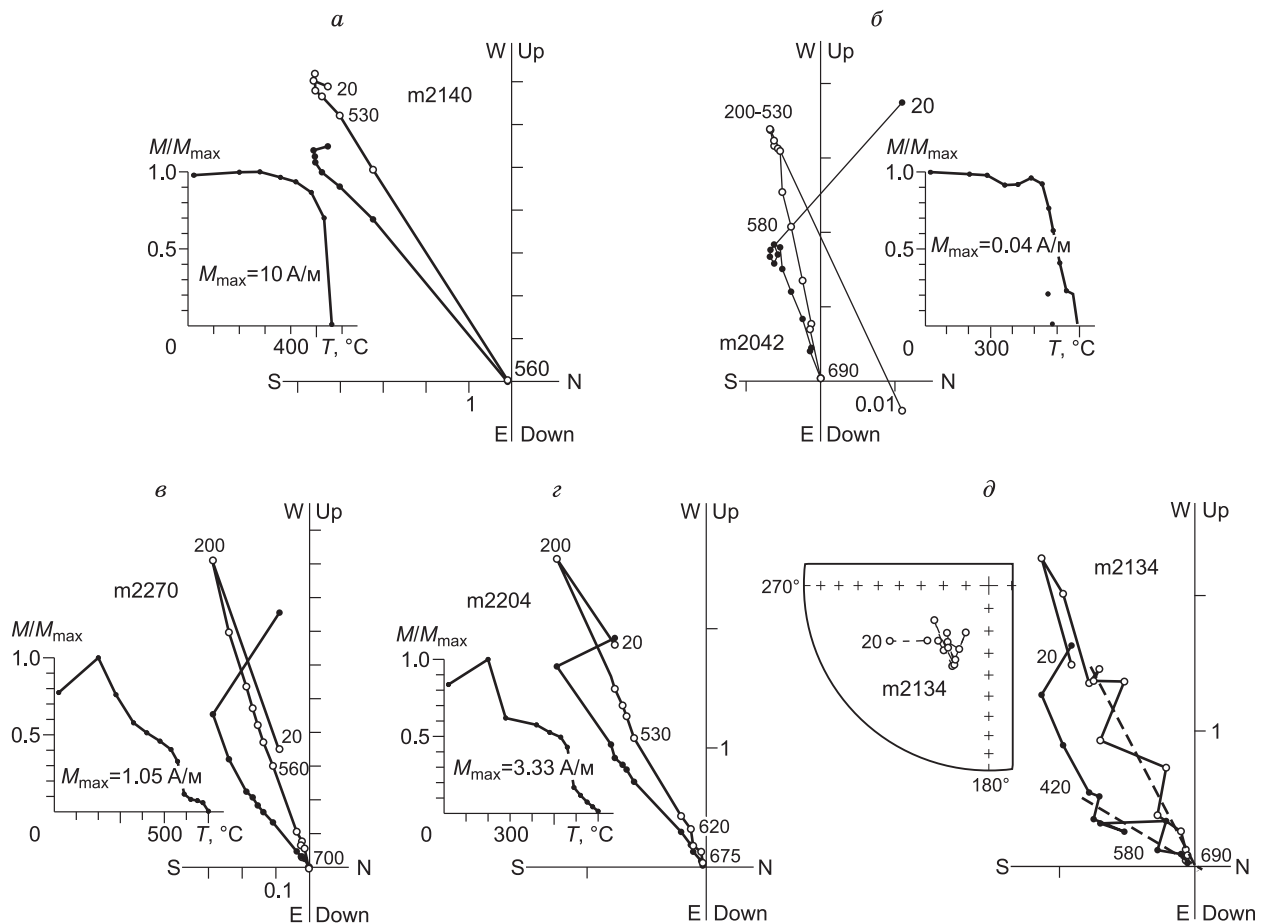


Рис. 2. Результаты размагничивания представительных образцов пермских вулканитов.

Диаграммы Зийдверельда даны в древней (стратиграфической) системе координат; залитые (незалитые) символы на них — проекция на горизонтальную (вертикальную) плоскость; штриховая линия на части «д» обозначает выделенную в образце высокотемпературную компоненту. Кривые зависимости величины естественной остаточной намагниченности нормированы на ее начальное значение. Все символы на стереограмме спроектированы на верхнюю полусферу.

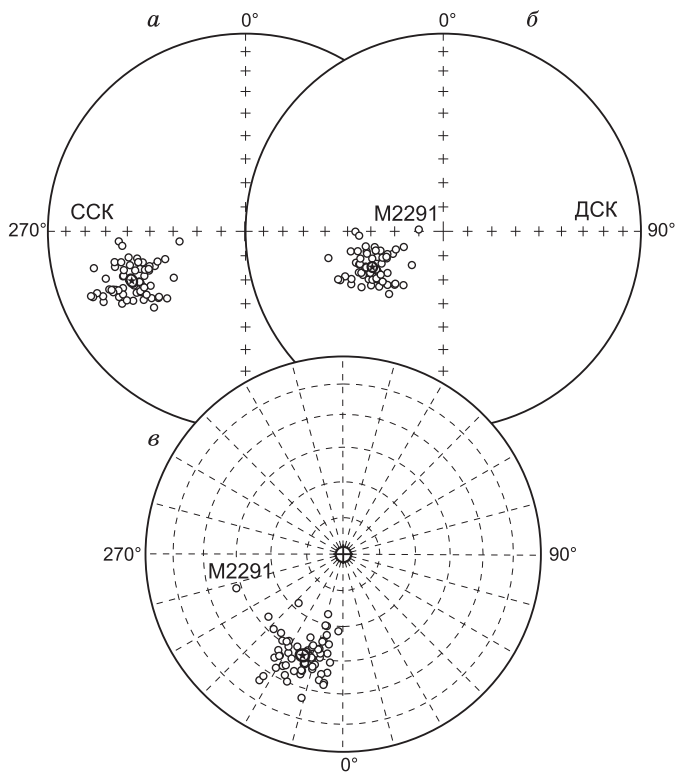


Рис. 3. Стереограммы средних по сайтам направлений высокотемпературной компоненты намагниченности (а, б) и соответствующих виртуальных полюсов (в) в современной (а) и древней (б, в) системах координат.

Единичные направления и полюсы обозначены кружками; круги доверия для них не показаны для лучшей читаемости. Средние направления для всей совокупности данных показаны звездочками с кругом доверия (жирная линия). Все символы и линии спроектированы на верхнюю полу-сферу.

Как правило, при последующих нагревах в 90 % образцов четко выделяется высокотемпературная компонента, ВТК, спадающая в начало координат на ортогональных диаграммах и везде имеющая обратную полярность (см. рис. 2, а—г). Лишь в 10 % коллекции данные размагничивания более шумные, но и в этих образцах идентификация ВТК проблем не составляет (см. рис. 2, д). Судя по блокирующим температурам, носителями этой компоненты являются магнетит и гематит в различной пропорции, причем в одном потоке могут при-

сутствовать образцы с разными ферромагнетиками. В тех случаях, когда можно было обоснованно выделить «магнетитовую» (ниже 580°) и гематитовую (выше 580°) компоненты (см. рис. 2, в), их направления совпадали в пределах первых градусов, а различия имели случайный характер. Следовательно, обе компоненты возникли в поле примерно одного направления. Такая картина достаточно часто встречается в лавовых толщах и обычно объясняется высокотемпературным окислением магнетита при застывании потоков или очень скоро после этого [Levashova et al., 2009; Swanson-Hysell et al., 2009]. Направления ВТК хорошо сгруппированы внутри потоков: значения кучности внутри сайтов варьируют от 30 до > 500 при среднем значении около 110. В итоге из 66 сайтов лишь для одного сайта (M2225) радиус круга доверия более 15°, а для 52 сайтов он меньше 10°.* В целом такое качество данных считается хорошим даже для позднекайнозойских данных при большом количестве образцов из каждого сайта [Johnson et al., 2008].

Палеомагнитные данные лучше сгруппированы в древней системе координат (ДСК), чем в современной (ССК), но различие статистически незначимо (рис. 3, а, б; табл. 1). Еще раз надо повторить, что изученный разрез совпадает с одним из объектов, изученных ранее [Levashova et al., 2003]. В этой статье описаны результаты по двум объектам, для одного из которых тест складки однозначно положительный, но объекты повернуты друг относительно друга. Поэтому был применен тест складки только для наклонений [McFadden, Reid, 1982], который оказался положительным; наилучшая сходимость наклонений также наблюдается в ДСК. Таким образом, намагниченность изученных вулканитов заведомо доскладчатая. Как уже говорилось, в этой толще не удалось обнаружить объекта для теста галек. Обратная полярность всех изученных потоков в разрезе мощностью не менее 1600 м скорее указывает на то, что намагниченность пород возникла во время суперхрона Киама, верхняя граница которого имеет возраст около 265 млн лет [Opdyke, Channell, 1996]. Наконец, полученный в этой работе полюс хорошо согласуется с раннепермским (290—270 млн лет) сегментом кривой миграции полюса стабильной Европы (рис. 4) [Torsvik, Cocks, 2005] и с возрастом 283.0 ± 2.4 млн лет, полученным нами по цирконам.

Средние по сайтам направления ВТК образуют компактное распределение в ДСК (см. рис. 3, б), но для оценки характеристик поля обычно проводится дополнительный отсев по величине круга доверия; также отбрасываются сайты с аномальными направлениями. Обычно требуется радиус круга доверия менее 10°, но иногда допускается и 15° [Johnson et al., 2008]. Если принять последний критерий, то надо отбросить только один сайт M2225 с $\alpha_{95} = 15.9^\circ$. В качестве критерия аномальности часто принимают требование, что единичный полюс должен отклоняться от среднего полюса всей совокупности

* Полная таблица средних по сайтам занимает более трех страниц, и для экономии места здесь не приводится. Получить ее можно прямо у автора, mibazh@mail.ru.

Таблица 1. Основные палеомагнитные результаты по верхнепермским лавам СВ Казахстана

Результат	<i>n</i>	ССК				ДСК				Комментарий
		<i>D</i> °	<i>I</i> °	<i>k</i>	α_{95} °	<i>D</i> °	<i>I</i> °	<i>k</i>	α_{95} °	
<i>Палеомагнитные направления</i>										
Среднее 1	66	246.5	-37.3	57.4	2.3	243.3	-57.0	79.1	2.0	Все сайты
Среднее 2	65	246.4	-37.4	57.0	2.4	243.1	-57.0	78.5	2.0	Без M2225
Среднее 3	64	246.3	-37.0	62.1	2.3	242.9	-56.6	87.4	1.9	Без M2225 и M2291
Среднее 4	52	246.0	-36.8	66.3	2.4	242.5	-56.5	94.0	2.0	Без M2291 и сайтов с $\alpha_{95} > 10^\circ$
DG + сайты	38	246.8	-37.3	52.4	3.2	243.7	-57.1	71.4	2.8	Все DG и сайты
DG + сайты	37	246.6	-36.4	51.8	3.3	243.4	-57.1	70.3	2.8	Без M2225
DG + сайты	36	246.4	-36.8	59.5	3.1	243.1	-56.5	83.7	2.6	Без M2225 и M2291
<i>Палеомагнитные полюсы</i>										
Полюс	<i>n</i>					Φ°	Λ°	<i>K</i>	A_{95}°	Комментарий
1	66					158.1	44.1	49.0	2.5	Все сайты
2	65					158.2	44.2	48.8	2.5	Без M2225
3	64					158.9	44.0	56.4	2.4	Без M2225 и M2291
4	52					159.3	44.3	61.1	2.5	Без M2291 и сайтов с $\alpha_{95} < 10^\circ$

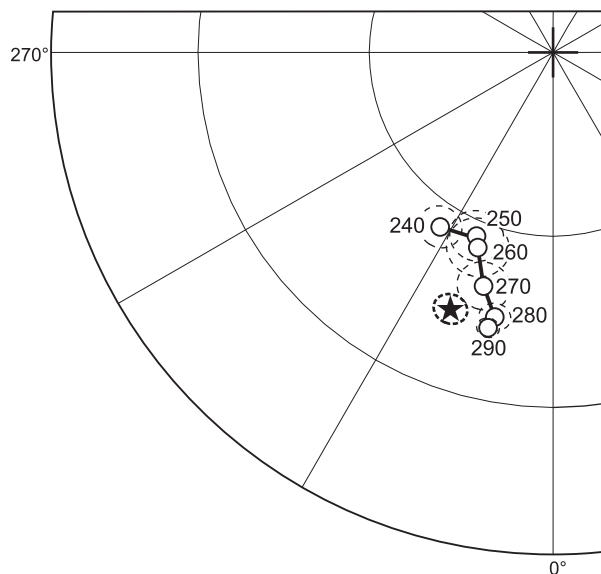
Примечание. Результаты обозначены как в тексте. ССК, ДСК, современная и древняя системы координат. *n* — число единичных векторов (сайтов и DG) или соответствующих полюсов. *D* — склонение, *I* — наклонение, *k* — кучность [Fisher, 1953]. α_{95} — радиус круга доверия, Φ — северная широта полюса, Λ — восточная долгота полюса, *K* — кучность, A_{95} — радиус круга доверия.

данных на угол более 45°. Только один сайт M2291 можно заподозрить в аномальности, особенно при рассмотрении распределения полюсов (см. рис. 3, б, в). Но и для этого результата этот угол заметно меньше — 36°, и сайт M2291 нельзя считать аномальным. Наконец, можно отбросить еще и сайты с α_{95} между 10° и 15°, и подсчитать среднее для оставшихся 52 сайтов. В итоге было рассчитано четыре средних направления и соответствующих полюса (табл. 1): 1 — все 66 сайтов; 2 — без сайта M2225 (65 сайтов); 3 — без сайтов M2225 и M2291 (64 сайта); 4 — только для сайтов с $\alpha_{95} < 10^\circ$ (52 сайта) и без сайта M2291. Все четыре средних вектора согласуются друг с другом в пределах градуса; значения кучности меняются несколько заметнее, но тоже несильно. Так как сайт M2225, безусловно, подлежит исключению, то для дальнейшего анализа будет использована опция 2 (см. табл. 1).

Известно, что если несколько потоков изливаются один за другим достаточно быстро (в течение десятков и первых сотен лет), направления ВТК в них будут очень схожими [Riisager et al., 2003; Chenet et al., 2008], и в распределении палеомагнитных направлений возникают тесные группы. (В англоязычной литературе такие кластеры называются *directional groups*, DG, соответствующего русского термина нет.) Для интерпретации вместо нескольких тесно сгруппированных средних по сайтам используется среднее для группы; степень сходства оценивается или с помощью статистического *F*-критерия, или просто по степени перекрытия кругов доверия. Необходимым условием такого подхода является возможность расставить данные в стратиграфической последовательности, что соблюдено в данном случае. С помощью такого подхода было получено

Рис. 4. Сравнение палеомагнитного полюса по лавам бакалинской свиты (звездочка с кругом доверия, показанным жирной штриховой линией) с кривой миграции Южного полюса стабильной Европы [Torsvik, Cocks, 2005].

Эталонные полюсы даны кружочками с кругами доверия (тонкие штриховые линии) с возрастными в миллионах лет и соединены толстой сплошной линией. Все символы и линии спроектированы на Южное полушарие.



38 средних векторов (15 DG и 23 сайта), причем большая часть групп состоит из двух соседних потоков. Как и для отдельных сайтов, было испробовано несколько вариантов расчета общего среднего, и все общие средние направления оказались близки, независимо от используемых данных и отбраковок отдельных результатов (табл. 1).

Здесь надо отметить, что существующие методы выделения DG хорошо работают для сравнительно рассеянных распределений, с кучностью менее 40. В нашем же случае кучность как минимум вдвое больше, а, значит, угловые расстояния между направлениями ВТК в соседних потоках с большой вероятностью могут оказаться меньше критического значения чисто случайно, особенно если средний вектор сайта имеет $\alpha_{0,5}$ около 10° . Особенно «подозрительны» DG из двух сайтов, а именно такие преобладают. Преодолеть эту сложность можно, только удвоив, а то и утроив количество образцов из потока, но это невыполнимо по многим причинам; ведь даже сейчас в коллекции более 400 образцов. Учитывая неопределенности в выделении DG и очень высокое сходство полученных результатов, для дальнейшего анализа был выбран результат, основанный на осреднении 65 сайтов (опция 2, см. табл. 1).

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для определения характеристик древнего геомагнитного поля очень важно определить кучность единичных направлений поля, а также оценить статистическую достоверность этого параметра. Как уже говорилось, для самых восточных сайтов было определено одно залегание, а для основной части коллекции — слегка от него отличное, что, разумеется, является упрощением, и в действительности в разрезе залегания наверняка несколько варьируют. В случае чисто доскладчатой намагниченности (как это и есть для ВТК в лавах бакалинской свиты) неполный учет залеганий обязательно должен привести к уменьшению истинного разброса, т.е. рассчитанная кучность должна быть меньше истинного значения. Следовательно, полученная величина кучности (см. табл. 1) является нижним пределом для истинного значения этого параметра.

Для изучения структуры поля критичным является вопрос о том, насколько хорошо в коллекции осреднены вековые вариации; для чего считается достаточным интервал времени порядка 100 тыс. лет [Merrill et al., 1996]. Прямых доказательств длительности изученного интервала — например, в виде серии датировок из различных частей разреза или присутствия зон разной полярности, — нет. С другой стороны, даже на наиболее активных и «регулярных» современных вулканах нигде не описаны разрезы мощностью более километра, в которых сотни потоков накопились бы намного быстрее, чем за 100 тыс. лет. Например, на Гавайях с их исключительно стабильным вулканизмом быстро накопившиеся интервалы имеют в несколько раз меньшую мощность [Laj et al., 1999]. Даже для траппов оценки продолжительности формирования соизмеримых по мощности толщ обычно составляют примерно миллион лет [Chenet et al., 2008]. О сравнительно продолжительном интервале накопления бакалинской свиты говорят и многочисленные окисленные корки потоков, свидетельствующие о перерывах в излияниях. Таким образом, можно с почти 100-процентной уверенностью утверждать, что вековые вариации хорошо осреднены в изученной коллекции.

Итак, значение кучности для всей коллекции примерно равно 80. Много это или мало? Ответ можно получить либо сравнив этот результат с данными по другим мощным лавовым толщам, либо с теоретическими моделями. Для первого подхода пришлось проанализировать имеющиеся данные по лавовым толщам, исключив только данные для интервала 0—5 млн лет (это тема для большой статьи). Для селекции были использованы следующие критерии:

1) результат получен в пределах небольшой территории, внутри которой тектонические движения маловероятны, а структурные данные непротиворечивы;

2) результат получен не менее чем по 25 отдельным лавовым потокам; небольшое количество даек допускалось, но данные по дайковым роям исключались, так как для них обычно нет никаких критериев для определения степени осреднения вековых вариаций;

3) из каждого магматического тела (потока или дайки) было изучено не менее пяти независимо отобранных образцов;

4) палеомагнитные данные по всем образцам получены с помощью детальной ступенчатой чистки и компонентного анализа результатов размагничивания [Kirschvink, 1980];

5) средние по сайтам должны быть определены не менее чем по четырем образцам и иметь погрешность менее 15° ;

6) аномальные сайты исключались по методу, описанному выше; если такой отсев был проведен авторами публикации, то принималась их оценка;

7) распределение единичных направлений после селекции представляет единое распределение.

Таблица 2. Основные характеристики изучавшихся мощных лавовых серий с возрастaми более 10 млн лет и палеомагнитные результаты по ним

№ п/п	Объект	ВОЗ	φ°	λ°	N	I°	α_{95}°	pLAT $^\circ$	ΔP°	k	E	Ссылки
1	США, горы Стинс	17	43	242	50/48	60.4	3.8	41.3	4.4	29.8	1.64	[1]
2	Сев. Китай	20	41	112	40/34	58.9	3.4	39.6	3.8	52.2	1.49	[2]
3	о. Кергелен	27	-49	69	98/92	-68.7	2.4	-52.0	3.4	40.3	1.42	[3]
4	Йемен, траппы	30	16	44	69/64	0.8	4.4	0.4	2.2	17.3	3.20	[4]
5	Фарерские о-ва	58	62	353	44/44	61.2	4.5	42.3	5.3	24.0	1.34	[5]
6	Индия, плато Деккан ¹	65	19	73	91/89	49.2	5.0	30.1	4.4	10.0	2.75	[6]
7	Арктика, Канада	95	79	267	37/37	80.1	3.6	70.8	6.6	56.4	1.52	[7]
8	Монголия ²	120	44	102	143/132	66.1	1.9	48.4	2.5	42.1	1.48	[8]
9	Сев. Аргентина, траппы	130	-32	296	59/52	-48.9	3.0	-29.8	2.6	44.3	1.33	[9]
10	р. Парана, траппы ³	130	-22	312	68/63	-34.0	3.1	-18.6	2.0	34.6	1.96	[10]
11	Лесото, траппы	180	-30	29	47/47	-53.7	3.2	-34.2	3.1	42.0	4.50	[11]
12	Сибирь, траппы	250	70	90	44/42	75.4	2.7	62.5	4.5	68.1	1.39	[12]
13	СВ Казахстан	280	49	81	66/65	57.0	2.0	37.6	2.1	79.1	1.62	[13]
14	оз. Верхнее, траппы	1100	47	269	77/70	44.1	2.4	25.8	1.9	49.3	1.49	[14]

Примечание. ВОЗ, округленный возраст в миллионах лет. φ — широта объекта (отрицательная для Южного полушария). λ — восточная долгота объекта. N — число единичных векторов (сайтов и DG): опубликованное/использованное. pLAT — палеоширота объекта, рассчитанная по дипольной формуле. ΔP — симметричный доверительный интервал для палеошироты. E — удлинение распределения единичных векторов [Tauxe, Kent, 2004]. Ссылки: [1] — Jarboe et al., 2008; [2] — Pan et al., 2005; [3] — Plenier et al., 2002; [4] — Riisager et al., 2005; [5] — Riisager et al., 2002; [6] — Chenet et al., 2009; [7] — Tarduno et al., 2002; [8] — van Hinsbergen et al., 2008; [9] — Geuna, Vizan, 1998; [10] — Ernesto et al., 1999; [11] — Kostrov, Perrin, 1996; [12] — Heunemann et al., 2004; [13] — эта работа; [14] — Tauxe, Kodama, 2009. Остальные обозначения, как в табл. 1.

¹ Анализ проведен для всех результатов (сайтов и DG, выделенных авторами) с $\alpha_{95} < 15^\circ$, которые пересчитаны для общей точки с указанными в таблице координатами.

² Использована вся совокупность данных.

³ Данные пересчитаны для общей точки с указанными в таблице координатами.

Надо сразу сказать, что данных любого возраста, удовлетворяющих всем критериям, крайне мало (табл. 2). Например, по эмейшаньским (пермским) лавам Китая есть много результатов, но совершенно четко выделяются взаимные вращения отдельных разрезов [Liu, Zhu, 2009, и ссылки в этой работе]. Обычно же число изученных потоков намного меньше допустимого минимума. Наконец, есть просто «сумасшедшие» результаты: например, в данных по Западной Гренландии большинство единичных векторов образуют два очень плотных кластера на расстоянии нескольких десятков градусов друг от друга [Riisager et al., 2003].

Очень важным параметром моделей вековых вариаций является зависимость амплитуды вековых вариаций от широты, или, в более общем случае, палеошироты. Лучше бы изучать это для разумно длинного, но все же ограниченного интервала времени, скажем, нескольких миллионов лет. Сейчас это возможно только для последних 5 млн лет, а более древних данных слишком мало, чтобы дальше делить их по возрасту. Так что пришлось строить единый для всех данных график кучности k от палеошироты φ ; последняя вычислялась по дипольной формуле ($\text{tg } I = 2 \text{ tg } \varphi$) с использованием среднего наклона I отдельного результата. Сразу же бросается в глаза большой разброс данных (рис. 5, а). При фантазии можно говорить о росте кучности от экватора к полюсу, но ее полет должен быть очень вольным. Заметна также явная скудость данных для низких (менее 20°) и высоких (более 60°) палеоширот. Второе еще можно объяснить — высокоширотные области на глобусе просто имеют сравнительно малую площадь. Явный же провал для тропиков непонятен — ведь использованы данные с очень разными возрастaми. Но даже для сравнительно хорошо изученных умеренных широт разброс данных выглядит слишком большим, чтобы его можно было «втиснуть» в единую закономерность. Можно возразить, что и принятый при селекции минимальный объем коллекции в 30 единичных замеров все равно слишком мал для уверенного определения кучности, по аналогии с обычной дисперсией для одномерных данных. Но примерно половина использованных результатов получена по 50 и более сайтам (см. рис. 5, а, большие значки), но их разброс ничуть не меньше.

Жирной штриховой линией на этом рисунке показана зависимость кучности от широты согласно модели вековых вариаций [Tauxe, Kent, 2004], разработанной для описания данных с возрастaми 0—

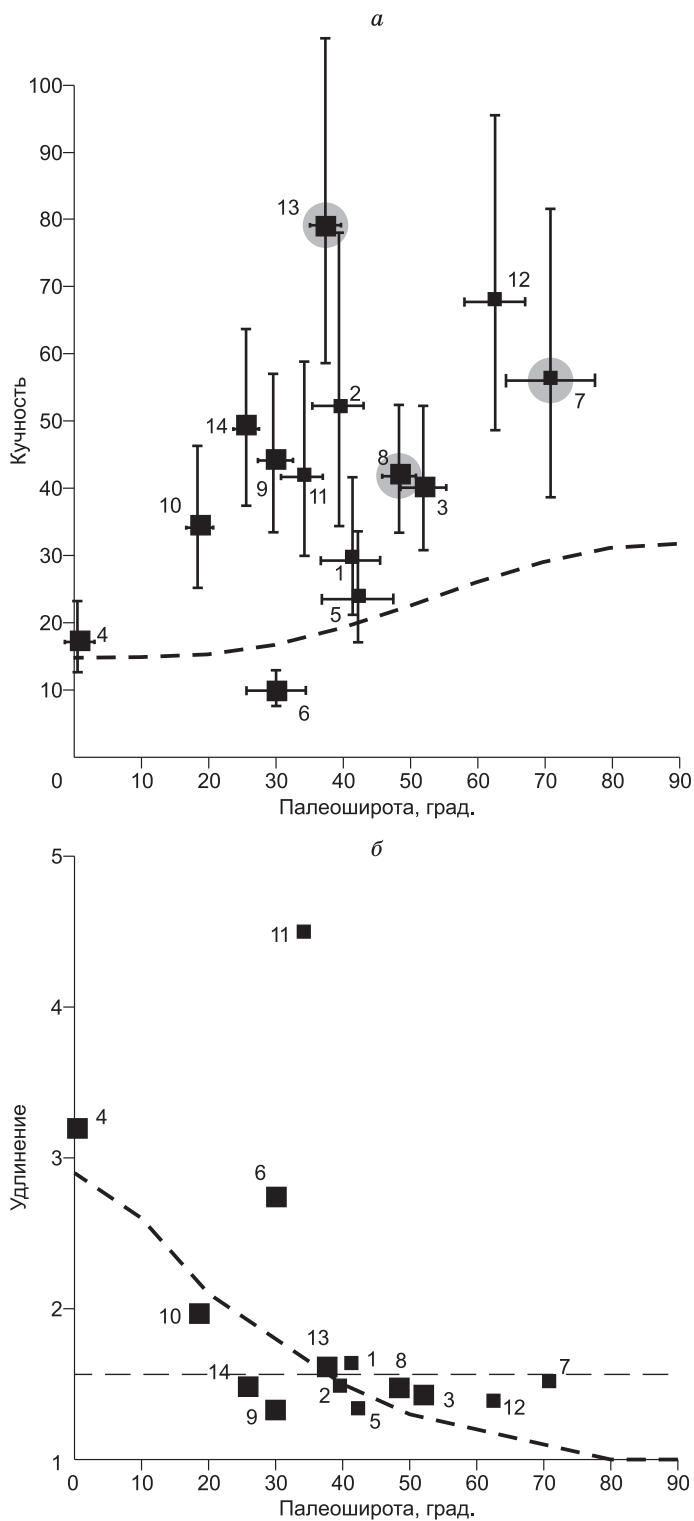


Рис. 5. Графики зависимости кучности единичных палеомагнитных направлений (а) и удлинения распределения этих направлений (б) от палеошироты.

Данные по Южному и Северному полушариям объединены и пронумерованы, как в табл. 2. Результаты, основанные на более чем 50 единичных направлениях, показаны большими значками. Жирные штриховые линии — предсказания модели вековых вариаций [Таухе, Кент, 2004], построенной на основе данных для последних 5 млн лет. На графике *а* погрешности в определении палеошироты (кучности) даны горизонтальными (вертикальными) линиями (для ряда результатов погрешности в определении палеошироты близки к размерам символов). Два результата по меловому суперхрону (№ 7) и суперхрону Киамы (№ 13) выделены серыми кругами. Тонкая штриховая линия на рисунке *б* — минимальное значение удлинения, которое можно статистически достоверно установить для коллекции из 50 единичных направлений.

5 млн лет, но весьма часто используемых для данных любого возраста. Видно, что теория предсказывает возрастание кучности (уменьшение дисперсии) палеомагнитных направлений от экватора к полюсу, но в остальном она весьма плохо согласуется с экспериментом.

Делались также предсказания, что амплитуда вековых вариаций (кучность может быть использована как один из параметров для оценки этой амплитуды) должна заметно отличаться для суперхронов одной полярности и эпох с частой сменой полярности [McFadden et al., 1988], что в целом подтверждалось имевшимися тогда данными. Справедливости ради надо заметить, что повторная проверка, проведенная недавно для гораздо большего массива более надежных данных, вроде бы подтвердила предсказание, но, по сравнению с предыдущим анализом [McFadden et al., 1988], выявила гораздо меньшие различия, близкие к данным со статистическими погрешностями [Biggin et al., 2008b]. Среди приведенных на рис. 5, *а* результатов три получены по суперхронам: № 7 по меловым базальтам Канадского архипелага [Tarduno et al., 2002], № 8 по меловым базальтам Монголии [van Hinsbergen et al., 2008] и № 13 по лавам СВ Казахстана (эта работа). № 7 и № 13 действительно они имеют

высокую кучность, причем пермский результат выше остальных, но зато № 8 ни в чем выдающемся заподозрить нельзя. Но три результата, и при этом ни одного из тропиков — это всего лишь три результата...

Модель вековых вариаций [Таухе, Кент, 2004] ввела в практику параметр «удлинение» (*E*), которое описывает степень удлинения распределения направлений. Согласно этой модели, максимальное удлинение (около 3) должно быть на экваторе, а к полюсу оно плавно спадает до 1 (см. рис. 5, *б*, жирная штриховая пунктирная линия); удлинение должно быть вдоль меридиана. Экспериментальные данные, казалось бы, неплохо удовлетворяют теории (за исключением точки № 11), если бы не одно «но». Дело

в том, что из-за выборочных флюктуаций любое распределение нескольких десятков палеомагнитных направлений всегда будет иметь удлинение больше чем единица, даже при отборе прямо на полюсе. Надо, чтобы величина удлинения была статистически значимой. Тонкой штриховой линией (см. рис. 5, б) показано 95%-е критическое значение удлинения для коллекции из 50 единичных векторов, и хорошо видно, что подавляющее большинство точек попадает или ниже этой линии (величина удлинения не значима), либо лишь немного выше ее (удлинение маргинально значимо). Дело просто в том, что этот параметр надежно оценивается только для коллекций более чем из 100 единичных направлений, о чем писали [Tauxe, Kent, 2004]. Но ведь таких совокупностей практически нет; вряд ли их будет много и в будущем — просто по малочисленности столь мощных лавовых толщ. Поэтому можно только удивляться тому, как лихо используют этот параметр для оценки занижения наклонов даже для коллекций из первых десятков единичных направлений.

Итак, с удлинением вроде бы ясно. Но что же все-таки вызывает столь высокий разброс значений кучности — ведь, согласно статистическим канонам, для вполне надежной оценки кучности (дисперсии) нужно около 50 единичных направлений? Здесь приходится ступить на очень зыбкую почву. Во-первых, вполне может быть, что во многих случаях даже большие коллекции по мощной толще недостаточны для хорошего осреднения вековых вариаций. Однако в большинстве коллекций (см. табл. 2) есть зоны разной полярности, что, скорее всего, говорит о длительности изученных интервалов в несколько миллионов лет. А раз таких биполярных результатов большинство, то разброс во многом обеспечен именно ими. Можно было бы ввести дополнительные критерии надежности для дальнейшей селекции данных, но вот только какие?

Допустим, что все результаты (см. табл. 2, рис. 5, а) не содержат грубых ошибок и, следовательно, являются хорошим приближением к реальности. Надо вспомнить, что в моделях вековых вариаций в явной или неявной форме присутствуют два краеугольных предположения: во-первых, вариации имеют глобально упорядоченную структуру, что, в частности, и приводит к появлению зависимости амплитуды вариаций от широты. Во-вторых, основные характеристики вековых вариаций остаются примерно одинаковыми для всего рассматриваемого интервала времени. Можно посчитать, что первое предположение не выполняется, но этому все же противоречат данные по полю позднего кайнозоя [Merrill et al., 1996; Johnson et al., 2008]. Да и с теоретической точки зрения такое предположение не выглядит правдоподобным [Merrill et al., 1996]. А что же со вторым предположением? Допускалось, что амплитуда вариаций может зависеть от частоты инверсий [Tarduno et al., 2002; Biggin et al., 2008b], о чем уже говорилось выше. Есть работы, в которых утверждается, что в архее уровень вариаций был ниже [Biggin et al., 2008a; Smirnov et al., 2011]. Но в целом второе предположение считалось корректным, но недавно была предложена гипотеза, что амплитуда вековых вариаций может меняться в несколько раз на сравнительно коротких — порядка первых миллионов лет — интервалах времени [Баженов, Левашова, 2011]. Допустив, что это так, наблюдаемый разброс данных (см. рис. 5, а) легко находит свое объяснение — просто на один график сведены данные по интервалам с исходно разными уровнями вариаций. Но это — тоже гипотеза, для подтверждения которой нужно много новых данных.

Мы благодарны Н.Я. Дворовой и О.А. Крежовских за их работу по размагничиванию коллекций. Эта работа получила финансовую поддержку за счет программы № 7 ОНЗ РАН и грантов РФФИ 09-05-00260 и 12-05-00513 и Национального научного фонда США (NSF) EAR-0909288 и EAR11-19038.

ЛИТЕРАТУРА

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.

Добрецов Н.Л. Раннепалеозойская тектоника и геодинамика Центральной Азии: роль раннепалеозойских мантийных плюмов // *Геология и геофизика*, 2011, т. 52 (12), с. 1957—1973.

Коробкин В.В., Буслов М.М. Тектоника и геодинамика западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (палеозойды Казахстана) // *Геология и геофизика*, 2011, т. 52 (12), с. 2032—2055.

Левашова Н.М., Дегтярев К.Е., Баженов М.Л. Ороклинальное изгибание среднепозднепалеозойских вулканических поясов Казахстана: палеомагнитные свидетельства и геологические следствия // *Геотектоника*, 2012, № 4, с. 42—61.

Ляпичев Г.Ф., Сейтмуратова Э.Ю., Тимофеева Е.И., Гоганова Л.А. Основные проблемы стратиграфии континентальных вулканогенных образований позднего палеозоя Центрального Казахстана // *Проблемы геологии и металлогении Центрального Казахстана*. М., Наука, 1993, с. 157—169.

Сальменова К.З., Кошкин В.Я. Стратиграфия и флора верхнего палеозоя Северного Прибалхашья. Алма-Ата, 1990, 160 с.

Самыгин С.Г. Чингизский сдвиг и его роль в структуре Центрального Казахстана. М., Наука, 1974, 208 с.

Тевелев А.В. Среднепозднепалеозойское развитие Урало-Казахстанской складчатой системы: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. М., МГУ, 2003, 50 с.

Тектоника Казахстана (Объяснительная записка к Тектонической карте Восточного Казахстана м-ба 1:2 500 000). М., Наука, 1982, 139 с.

Хаин В.Е. Региональная геотектоника (Внеальпийская Азия и Австралия). М., Недра, 1979, 356 с.

Biggin A.J., Strik G.H.M.A., Langereis C.G. Evidence for a very-long-term trend in geomagnetic secular variation // *Nature Geosci.*, 2008a, № 1, p. 395—398.

Biggin A.J., van Hinsbergen D.J.J., Langereis C.G., Straathof G.B., Deenen M.H.L. Geomagnetic secular variation in the Cretaceous Normal Superchron and in the Jurassic // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2008b, v. 169, p. 3—19.

Chenet A., Fluteau F., Courtillot V., Gerard M., Subbarao K.V. Determination of rapid Deccan eruptions across the Cretaceous-Tertiary boundary using paleomagnetic secular variation: results from a 1200-m-thick section in the Mahabaleshwar escarpment // *J. Geophys. Res.*, 2008, v. 113, B04101, doi.org/10.1029/2006JB004635.

Cogne J.P. PaleoMac: a Macintosh application for treating paleomagnetic data and making plate reconstruction // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2003, 4(1), 1007, doi:10.1029/2001GC000227.

Ernesto M., Raposo M.B., Marques L., Renne P., Diogo L., Min A. Paleomagnetism, geochemistry, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the North-eastern Parana Magmatic Province: tectonic implications // *J. Geodyn.*, 1999, v. 28, p. 321—340.

Fisher R.A. Dispersion on a sphere // *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 1953, v. 217, p. 295—305.

Geuna S.E., Vizan H. New Early Cretaceous paleomagnetic pole from Cordoba Province (Argentina): revision of previous studies and implications for the South American database // *Geophys. J. Int.*, 1998, v. 135, p. 1085—1100.

Heunemann C., Krasa D., Soffel H.C., Gurevitch E., Bachtadse V. Directions and intensities of the Earth's magnetic field during a reversal: results from the Permo-Triassic Siberian trap basalts, Russia // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, v. 218, p. 197—213.

Jarboe N.A., Coe R.S., Renne P.R., Glen J.M.G., Mankinen E.A. Quickly erupted volcanic sections of the Steens Basalt, Columbia River Basalt Group: secular variation, tectonic rotation, and the Steens Mountain reversal // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2008, v. 9, Q11010, doi:10.1029/2008GC002067.

Johnson C.L., Constable C.G., Tauxe L., Barendregt R., Brown W., Coe L.L., Layer R.S., Mejia P.W., Opdyke N.D., Singer B.S., Staudigel H., Stone D.B. Recent investigations of the 0- to 5-Ma geomagnetic field recorded by lava flows // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2008, № 9, Q04032, http://dx.doi.org/10.1029/2007GC001696.

Kirschvink J.L. The least-square line and plane and the analysis of paleomagnetic data // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1980, v. 62, p. 699—718.

Kosterov A.A., Perrin M. Paleomagnetism of the Lesotho basalt, southern Africa // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1996, v. 139, p. 63—78.

Laj C., Guillou H., Szeremeta N., Coe R. Geomagnetic paleosecular variation at Hawaii around 3 Ma from a sequence of 107 lava flows at Kaena Point (Oahu) // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, v. 170, p. 365—376.

Levashova N.M., Degtyarev K.E., Bazhenov M.L., Collins A.Q., Van der Voo R. Permian paleomagnetism of East Kazakhstan and the amalgamation of Eurasia // *Geophys. J. Int.*, 2003, v. 152, p. 677—687.

Levashova N.M., Abrajevitch A.V., Van der Voo R., Bazhenov M.L. Paleomagnetism of mid-Paleozoic subduction-related volcanics from the Chingiz Range in NE Kazakhstan: the evolving paleogeography of an amalgamating Eurasian supercontinent // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 2009, v. 121, p. 555—573.

Liu C.Y., Zhu R.X. Geodynamic significances of the Emeishan Basalts // *Earth Sci. Frontiers*, 2009, v. 16, p. 52—69.

McFadden P.L., Reid A.B. Analysis of paleomagnetic inclination data // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1982, v. 69, p. 307—319.

McFadden P., Merrill R., McElhinny M. Dipole / quadrupole family modeling of paleosecular variation // *J. Geophys. Res.*, 1988, v. 93(B10), p. 11583—11588.

Merrill R.T., McElhinny M.W., McFadden P.L. The magnetic field of the Earth. San Diego, Acad. Press, 1996, 527 p.

Opdyke N.D., Channell J.E.T. Magnetic stratigraphy // *Int. Geophys. Ser.*, v. 64, London, New York, Academic Press, 1996, 346 p.

Pan Y., Hill M.J., Zhu R. Paleomagnetic and paleointensity study of an Oligocene-Miocene lava sequence from the Hannuoba Basalts in northern China // *Phys. Earth Planet. Int.*, 2005, v. 151, p. 21—35.

Plenier G., Camps P., Henry B., Nicolaysen K. Palaeomagnetic study of Oligocene (24—30 Ma) lava flows from the Kerguelen Archipelago (southern Indian Ocean): directional analysis and magnetostratigraphy // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2002, v. 133, p. 127—146.

Riisager P., Riisager J., Abrahamsen N., Waagstein R. New paleomagnetic pole and magnetostratigraphy of Faroe Islands flood volcanics, North Atlantic igneous province // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, v. 201, p. 261—276.

Riisager J., Riisager P., Pedersen A.K. Paleomagnetism of large igneous provinces: case-study from West Greenland, North Atlantic igneous province // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, v. 214, p. 409—425.

Riisager P., Knight K.B., Baker J.A., Peate I.U., Al-Kadasi M., Al-Subbary A., Renne P.R. Paleomagnetism and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Yemeni Oligocene volcanics: implications for timing and duration of Afro-Arabian traps and geometry of the Oligocene paleomagnetic field // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2005, v. 237, p. 647—672.

Smirnov A.V., Tarduno J.A., Evans D.A.D. Evolving core conditions ca. 2 billion years ago detected by paleosecular variation // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2011, v. 187, p. 225—231.

Swanson-Hysell N.L., Maloof A.C., Weiss B.P., Evans D.A.D. No asymmetry in geomagnetic reversals recorded by 1.1-billion-year-old Keweenawan basalts // *Nature Geosci.*, 2009, v. 2, p. 713—717.

Tarduno J.A., Cottrell R.D., Smirnov A.V. The Cretaceous superchron geodynamo: observations near the tangent cylinder, *PNAS*, 2002, v. 99, p. 4020—4025.

Tauxe L., Kent D.V. A simplified statistical model for the geomagnetic field and the detection of shallow bias in paleomagnetic inclinations: Was the ancient magnetic field dipolar? // *Timescales of the paleomagnetic Field* / Eds. J.E.T. Channell, D.V. Kent, W. Lowrie, and J.G. Meert. *AGU Geophys. Monogr.*, 2004, v. 135, p. 101—116.

Tauxe L., Kodama K.P. Paleosecular variation models for ancient times: clues from Keweenawan lava flows // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2009, v. 177, p. 31—45.

Torsvik T.H., Cocks L.R.M. Norway in space and time: a Centennial cavalcade // *Norwegian J. Geol.*, 2005, v. 85, p. 73—86.

van Hinsbergen D.J.J., Straathof G.B., Kuiper K.F., Cunningham W.D., Wijbrans J. No vertical axis rotations during Neogene transpressional orogeny in the NE Gobi Altai: coinciding Mongolian and Eurasian Early Cretaceous apparent polar wander paths // *Geophys. J. Int.*, 2008, v. 173, p. 105—126.

Zijderveld J.D.A. AC demagnetization of rocks: analysis of results / Eds. D.W. Collinson, K.M. Creer // *Methods in paleomagnetism*. Elsevier, Amsterdam, 1967, p. 254—286.

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

*Поступила в редакцию
13 ноября 2012 г.*