

УДК 550.384.551.733

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ, ИСКАЖАЮЩИХ ПАЛЕОМАГНИТНУЮ ЗАПИСЬ, НА ОЦЕНКУ ПАРАМЕТРОВ ДРЕВНИХ ВЕКОВЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОСЛОЙНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОСАДОЧНЫХ РАЗРЕЗОВ

© 2021 г. В. Э. Павлов^{1,2,*}, Ш. Р. Богоутдинов^{1,3,**}, О. А. Мещерякова^{1,***}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный Университет, г. Казань, Россия

³Геофизический центр РАН (ГЦ РАН), г. Москва, Россия

*e-mail: pavlov.ifz@gmail.com

**e-mail: shm.bog@gmail.com

***e-mail: oliya@ifz.ru

Поступила в редакцию 04.06.2020 г.

После доработки 10.08.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

В работе представлены результаты численного моделирования влияния основных факторов, искажающих палеомагнитную запись в осадочных породах, а именно: осреднения сигнала и занижения наклона, на оценку параметров вековых вариаций (их амплитуды, степени вытянутости распределения направлений и направления вытянутости этого распределения) записанных в осадочных разрезах. В качестве примера практического применения полученных результатов на их основе выполнена оценка перспективности разреза Хонако-2 — одного из лучших лессовых разрезов Центральной Азии — для поиска записи в нем геомагнитных экскурсов. Получены численные оценки вероятности обнаружения экскурсов разных типов в палеомагнитной записи верхних горизонтов этого разреза.

DOI: 10.31857/S0016794021020097

1. ВВЕДЕНИЕ

Для изучения эволюции магнитного поля Земли на протяжении ее геологической истории используют четыре основных параметра: напряженность геомагнитного поля, частоту геомагнитных инверсий, геометрию геомагнитного поля (т.е. соотношение дипольных и не дипольных членов его сферического разложения) и, наконец, амплитуду геомагнитных вариаций. Информация о характере изменений каждого из этих параметров необходима для понимания эволюции нашей планеты и ее внутренних оболочек; для тестирования различных геодинамических моделей, для развития теории геомагнетизма и проч. В настоящей статье рассматривается вопрос о возможности изучения одного из этих четырех параметров — амплитуды вековых вариаций геомагнитного поля древних геологических эпох (PSV — paleosecular variations) по палеомагнитной записи, сохранившейся в осадочных горных породах.

С точки зрения перспектив изучения вековых вариаций геологическую историю можно разделить на два совершенно несоразмерных интервала.

Первый из них отвечает, приблизительно, голоцену, т.е. примерно последним десяти — одиннадцати тысячам лет, включающим в себя исторический период, начавшийся с появлением письменности и первых цивилизаций. Достигнутая для этого временного интервала точность определения возраста природных объектов или продуктов человеческой деятельности, используемых для определения характеристик древнего геомагнитного поля, позволяет, в принципе, построить детальные кривые изменения его элементов (склонения D , наклона I , напряженности и др.) во времени. Время, к которому относятся точки на этих кривых, для голоцена может определяться с точностью до 50–100 лет и даже лучше. Датирование в этом случае осуществляется историческими, археологическими и физическими методами.

Для геологических эпох, предшествующих условному рубежу в 10–11 тысяч лет назад, точность и надежность определения возраста объектов, по которым можно восстанавливать характеристики древнего геомагнитного поля, и само

количество таких объектов резко падает. Соответственно, резко уменьшаются возможности построения более или менее непрерывных кривых изменения элементов геомагнитного поля и привязки их к геохронологической шкале.

Идеальной формой описания эволюции геомагнитного поля является математическая модель, которая для заданных координат и для заданного момента времени позволяет определить все элементы геомагнитного поля [например, Korte et al., 2011]. Палео- и археомагнитные данные, которые уже имеются и будут получены в будущем для времени, примерно отвечающему голоцену, можно использовать для построения таких моделей.

Далее вглубь времен, из-за снижения точности определения возраста, построение подобных моделей представляется крайне проблематичным, если не невозможным. Поэтому для изучения вековых вариаций геомагнитного поля более древних эпох используют другой подход, состоящий в изучении некоторых параметров вековых вариаций. Главным из этих параметров является разброс (угловое стандартное отклонение) S_p виртуальных геомагнитных полюсов (VGP), который рассматривается как мера амплитуды палео вековых вариаций [Сох, 1970]. Эпохи с большими величинами S_p отвечают времени с повышенными амплитудами вековых вариаций, более возбужденному состоянию геомагнитного поля, и наоборот.

Наряду с основным параметром S_p для изучения вековых вариаций в геологическом прошлом используют также (но, в значительно меньшей степени) форму распределения направлений геомагнитного поля, которая может быть охарактеризована параметром E (elongation, вытянутость) и направлением вытянутости D_{V_2} [Tauxe and Kent, 2004].

В подавляющем большинстве исследований, посвященных изучению PSV, виртуальные геомагнитные полюсы рассчитываются по палеомагнитным данным, полученным по вулканическим породам, чаще всего – по лавовым потокам, излившимся в течение рассматриваемого интервала геологического времени. Между тем эпохи вулканической активности распределены в истории Земли и на ее поверхности крайне неравномерно, что существенно ограничивает возможности получения представительной информации о характере вековых вариаций геомагнитного поля в геологическом прошлом.

Осадочные породы на поверхности Земли (по крайней мере, в пределах ее континентальной части) распространены значительно шире и “покрывают” суммарно значительно более длительный интервал геологической истории (по край-

ней мере, в протерозое и фанерозое), чем вулканические породы. Естественно, поэтому, что осадочные породы могут представлять большой интерес как носитель информации о древних вековых геомагнитных вариаций в геологическом прошлом.

Между тем широко известно, что при формировании палеомагнитной записи в осадочных породах в результате действия различных процессов часто происходит искажение, своего рода фильтрация, исходного сигнала (т.е. временной последовательности элементов геомагнитного поля). В качестве таких фильтров наиболее часто “работают” осреднение характеристик геомагнитного поля и занижение его наклона.

При изучении вековых вариаций по палеомагнитным записям в осадочных разрезах, в зависимости от конкретных целей исследований, можно использовать две разные стратегии отбора проб. Первая из них предполагает отбор образцов, разделенных по времени промежутками, достаточными, чтобы считать, что эти образцы записали нескоррелированные, “независимые” состояния геомагнитного поля. Вторая стратегия подразумевает сплошной отбор образцов из осадочного разреза.

Первая стратегия менее трудоемка, но, в отличие от второй, не позволяет определить ряд важных характеристик геомагнитных вариаций, в частности, характер изменения поля на относительно малых (порядка сотен и первых тысяч лет) масштабах времени.

Представляется, что влияние “геологических фильтров” может сказываться на определяемых параметрах вековых вариаций по-разному в зависимости от выбора стратегии отбора. В данной работе мы рассмотрим, как эти фильтры влияют на параметры вековых вариаций, определенные по палеомагнитной записи, полученной при сплошном опробовании осадочных разрезов.

2. МЕТОД

Параметр S_p рассчитывается следующим образом [Сох, 1969]:

$$S_p^2 = (N - 1)^{-1} \sum_{i=1}^N (\Delta_i)^2, \quad (1)$$

где N – число используемых для расчета виртуальных геомагнитных полюсов, а Δ_i – угол отклонения i -го VGP от географического полюса (для последних 5 млн лет, когда движениями плит можно пренебречь) или от средней точки распределения VGP (для более древних времен).

Виртуальные геомагнитные полюсы рассчитываются по дипольной формуле [Храмов и др., 1982] по среднему направлению, определенному

для каждого изученного потока, если работа выполняется с вулканическими потоками; при работе с осадочными породами для расчета VGP используются средние направления, определенные для каждого изученного слоя.

Для получения несмещенной оценки S_p необходимо, чтобы расчетный параметр отражал полный размах вековых вариаций. Для этого обычно предлагается использовать достаточно большое число независимых направлений [Biggin et al., 2008]. Таковыми являются направления, отражающие состояния поля, отстоящие друг от друга по времени на расстояние более чем в 3 раза превышающее характеристическое время автокорреляционной функции для первого (дипольного) члена сферического разложения и составляющее не менее чем 2000 лет [Hongre et al., 1998]. На практике, такое различие возраста слоев в разрезе бывает трудно либо невозможно определить. В этом случае для проверки независимости направлений, полученных по вулканическим потокам, проверяют наличие между ними сериальной корреляции [Biggin et al., 2008].

Отметим, однако, что коррелированные направления также могут быть использованы для корректного расчета S_p при условии, что они отражают поведение геомагнитного поля на достаточно большом интервале времени. Вопрос о том, что такое “достаточно большой” интервал времени будет рассмотрен в следующих разделах.

Число используемых независимых направлений (= числу потоков, при изучении вулканических последовательностей), согласно [Biggin et al., 2008] должно быть не меньше 18–20. В противном случае, надежность определения S_p резко падает.

Для исключения влияния аномальных состояний поля (инверсий, экскурсов) или ошибок, связанных с измерениями и/или подготовкой образцов, используются критические углы отклонения VGP (cut-off) от среднего направления, превышение которых приводит к изъятию данного VGP из рассматриваемого распределения. Критические углы (A) выбирают либо постоянными, равными для всех распределений, например, 45° (см. для обзора [McElhinny and McFadden, 1997]), либо их рассчитывают по итеративному методу Вандамма для каждого распределения [Vandamme, 1994]:

$$A = 1.85S^* + 5^\circ, \quad (2)$$

где S^* равно S_p для исходного и каждого последующего распределений, получаемых при текущем отсечении аномальных VGP.

В работе [Johnson et al., 2008] показано, что, во время как в большинстве случаев оба метода дают близкие оценки величины S_p , встречаются также примеры, когда применение метода Ван-

дамма может привести к завышенным оценкам. Поэтому, вслед за [Johnson et al., 2008] для отсечения “выбросов” мы выбираем (и используем в нашем моделировании) постоянную величину угла отсечения равную 45°.

Для расчета величины Elongation (E) и ее направления (D_{V_2}), составляют ориентационную матрицу T:

$$T = \begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где x_i , y_i и z_i – проекции единичного вектора, отвечающего i -му направлению в рассматриваемом распределении палеомагнитных направлений на оси X (север), Y (восток) и Z (вниз).

Затем определяют собственные значения этой матрицы τ_1 , τ_2 , τ_3 ($\tau_1 > \tau_2 \geq \tau_3$) и соответствующие им собственные векторы V_1 , V_2 , V_3 . По этим данным определяют величину $E = \tau_1/\tau_2$. При этом направление Elongation D_{V_2} определяется как склонение вектора V_2 [Tauxe and Kent, 2004].

Выполненные нами расчеты базируются на моделировании временных рядов склонения и наклонения, имитирующих вековые геомагнитные вариации в заданной точке земной поверхности. Метод построения таких рядов описан в работе [Хохлов, 2012]. Значения склонений и наклонений при этом определяются из модели ТК03 [Tauxe and Kent, 2004], которая в настоящий момент широко используется при изучении палео вековых вариаций.

Расчеты исследуемых величин и их доверительных интервалов проведены с применением метода Монте-Карло. Обычно при этом (если это специально не обговаривается в тексте) используется 1000 реализаций временных последовательностей склонения и наклонения, имитирующих вековые геомагнитные вариации.

При моделировании занижения наклонения мы используем параметр f , характеризующий степень занижения наклонения при записи направления геомагнитного поля в осадочной породе. Этот параметр определяется из формулы [King, 1955]:

$$\operatorname{tg} I_0 = f \operatorname{tg} I_f, \quad (4)$$

где I_0 – наклонение, определенное по палеомагнитной записи, а I_f – наклонение геомагнитного поля.

3. КАКОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕРВАЛ ВРЕМЕНИ ДОЛЖЕН БЫТЬ ОПРОБОВАН ПРИ СПЛОШНОМ ОТБОРЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСМЕЩЕННОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРА S_p ?

При сплошном отборе шаг отбора по мощности определяется размером палеомагнитного образца (с учетом потерь при его подготовке), а шаг по времени — скоростью осадконакопления. При одном и том же шаге по мощности шаг по времени может принимать различные значения.

При изучении осадочного разреза можно опробовать интервалы разреза различной мощности, которые будут отвечать разным интервалам времени. Если взять очень короткий (по сравнению с характерными временами вековых вариаций [Hongre et al., 1998]) интервал, то полученное значение S_p , скорее всего, будет мало по сравнению с истинным S_p , так как будет характеризовать не весь размах вариаций, а только его часть. При увеличении длины отбора измеренное S_p будет увеличиваться, поскольку будет определяться по направлениям, захватывающим все больший размах вариаций. Начиная с некоторой длины исследуемого временного интервала, весь размах вариаций будет захвачен и величина S_p стабилизируется, перестанет расти.

Определив эту величину, с учетом имеющихся представлений о скорости накопления конкретных исследуемых разрезов, можно определить минимальную мощность разреза необходимую для опробования. Это знание важно, поскольку детальный отбор достаточно трудоемок и, соответственно, крайне желательно не выполнять отбора образцов сверх необходимости.

Для ответа на поставленный вопрос нами выполнено моделирование, результаты которого представлены на рис. 1. Моделирование выполнялось следующим образом:

1. В рамках модели ТК03 для точки с широтой 10° N генерировались серии по 1000 реализаций рядов склонений и наклонений длиной 200 лет для числа равномерно отобранных из этого интервала образцов (=число точек в реализации) 20, 50 и 100.

2. Для каждой реализации рассчитывалась величина S_p . Для каждой серии, отвечающей разному числу образцов, рассчитывалось среднее значение S_p и его 95% доверительный интервал.

3. Затем то же самое повторялось для рядов длительностью 400, 800, 1200, 2400, 4000, 6000, 9000, 12000, 15000, 20000, 25000, 30000, 40000 и 50000 лет.

4. Далее такие же расчеты проводились для точек с широтами 40° N и 70° N.

Поскольку используемая модель ТК03 осесимметрична, результаты расчетов не зависят от долготы географической точки, для которой производится расчет.

Как и ожидалось, расчетная величина среднего S_p растет с увеличением интервала отбора (рис. 1). При этом стабилизация среднего значения наступает достаточно быстро, и к тому моменту, когда длина интервала начинает превышать 9–10 тыс. лет, рост прекращается, и эта длина не зависит от широты и от числа образцов.

Между тем, в конкретном изучаемом разрезе мы имеем дело не с 1000 реализаций процесса, а всего лишь с одной, поэтому нас должна интересовать ширина доверительного интервала, внутри которого лежит искомое несмещенное значение S_p . Ширина этого интервала, как видно из рис. 1, зависит от длины исследуемого интервала и от числа образцов. Чем больше рассматриваемый временной интервал, тем большее влияние число образцов оказывает на ширину доверительного интервала.

Ширина доверительного интервала сужается при увеличении длины рассматриваемого интервала времени до 25–30 тысяч, после чего ее изменение становится почти незаметным. При этом при числе образцов 50–100 ширина доверительного интервала составляет 5° – 7° . Таким образом, при выборе стратегии сплошного отбора для получения несмещенной оценки S_p с точностью $\sim 5^\circ$ – 7° градусов по 50–100 образцам, необходимо опробовать интервал разреза, накопление которого происходило не менее 25–30 тысяч лет.

4. КАКОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕРВАЛ ВРЕМЕНИ ДОЛЖЕН БЫТЬ ОПРОБОВАН ПРИ СПЛОШНОМ ОТБОРЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСМЕЩЕННОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРА E ?

Для оценки длительности необходимого интервала опробования при *детальном отборе* нами выполнено моделирование, результаты которого представлены на рис. 2.

Моделирование выполнялось следующим образом.

1. В рамках модели ТК03 генерировались серии по 1000 реализаций рядов D и I с шагами 100, 200, 500 лет и 1000 лет и длиной рядов 100, 200, 300, 500, 750, 1000, 1500 и 2000 шагов (количество шагов в ряду + 1 = число образцов) для широт 0° , 45° и 85° N.

2. По каждой реализации рассчитывался параметр E , для каждой серии рассчитывались среднее значение E и соответствующий 95% доверительный интервал.

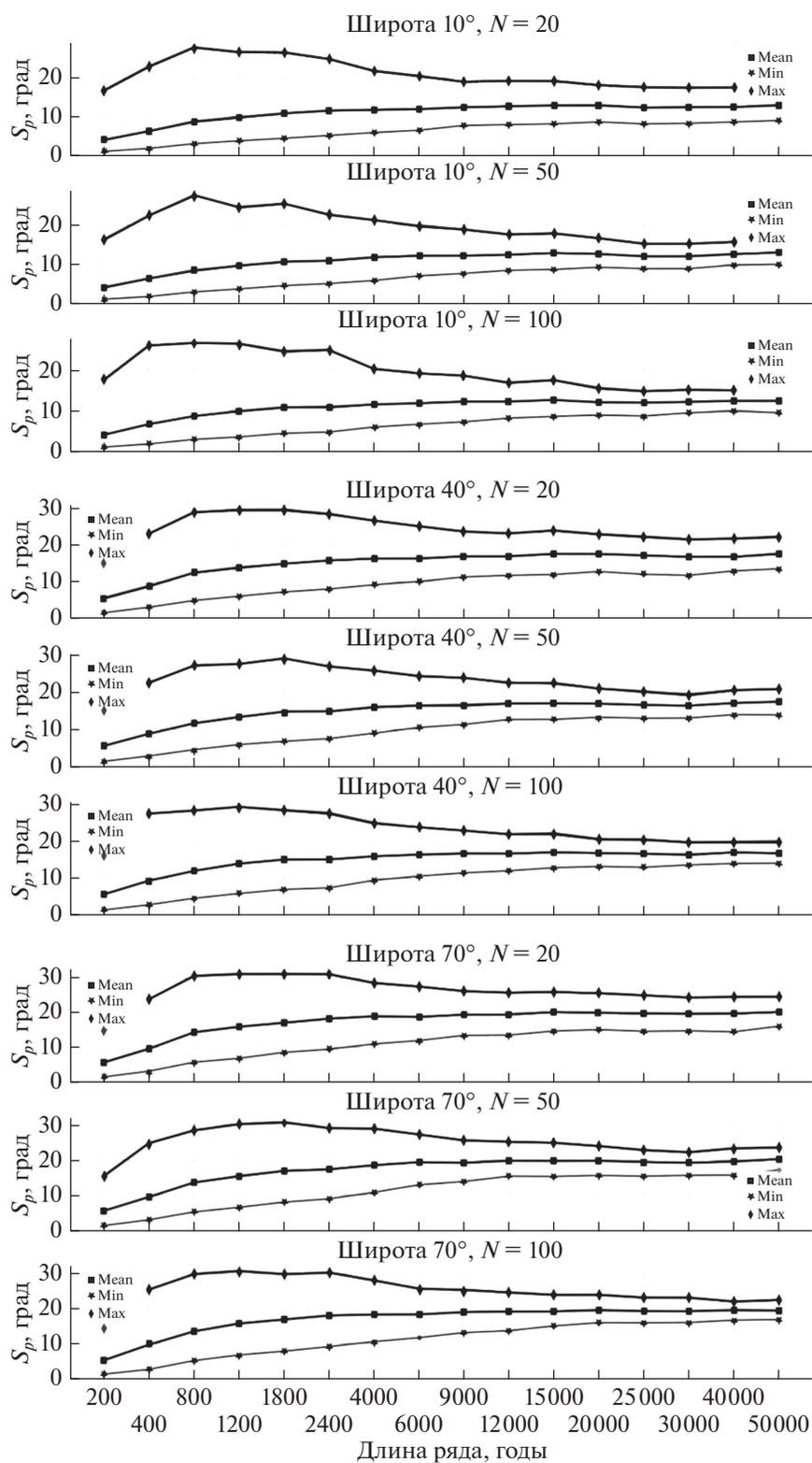


Рис. 1. Зависимость параметра S_p от длины анализируемого интервала для широт 10° , 40° , 70° . $N = 20, 50, 100$ – число образцов, по которым определен параметр S_p .

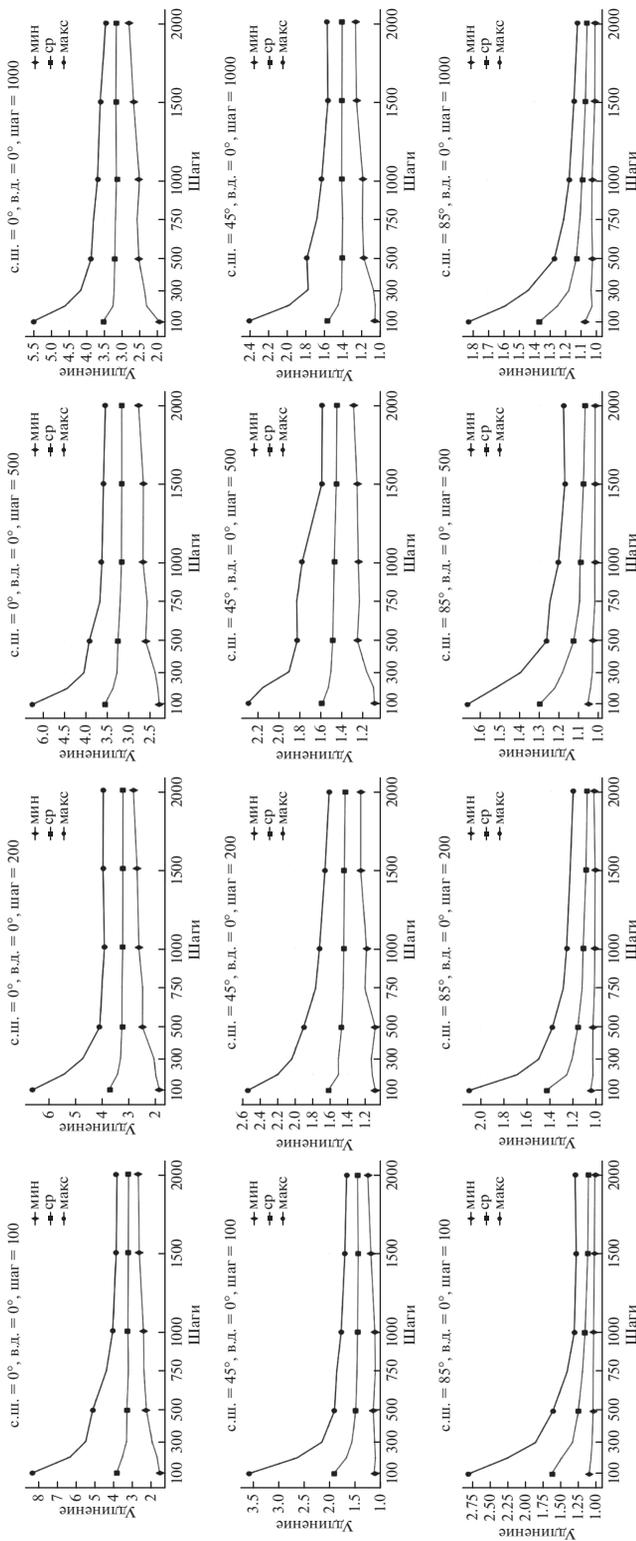


Рис. 2. Зависимость параметра E от числа шагов отбора (длины анализируемого интервала).

Величину шага отбора 200 лет мы выбрали исходя из того, какую мощность разреза при детальном отборе представляет один стандартный па-

леомагнитный образец (кубик $2 \times 2 \times 2$ см) при средней скорости накопления (например, лессов) $\sim 15\text{--}20$ см за 1 тысячу лет. Шаги в 100, 500 и 1000 лет выбраны для рассмотрения разрезов со скоростями осадконакопления меньшими и большими, чем $15\text{--}20$ см за тысячу лет.

Как видно из рис. 2, стабилизация значений E зависит не столько от длительности анализируемого ряда, сколько от количества шагов. Стабилизация величины E происходит при количестве шагов (уровней) отбора ~ 750 , и это количество шагов практически, не зависит ни от широты, ни от величины шага (по крайней мере, для длин шагов больших 100 лет).

С увеличением числа шагов выше 750 ширина доверительного интервала уменьшается незначительно. Отметим при этом, что ширина доверительного интервала зависит от широты и, например, для количества шагов 750 и шага отбора 100 лет изменяется от ~ 2.2 до ~ 0.2 при изменении широт от 0° N до 85° N. Для шага отбора 200 лет соответствующая ширина доверительного интервала меняется от 0.80 до 0.16. Отсюда, в частности, следует, что при использовании стратегии сплошного отбора, точность определения параметра E выше на более высоких широтах.

Таким образом, выполненное моделирование позволяет сделать вывод о том, что оптимальным выбором для получения несмещенной оценки параметра E при выполнении непрерывного отбора должно быть изучение палеомагнитных образцов не менее чем с 750 последовательных уровней. Поскольку расчеты выполнялись для интервалов отбора от 100 лет и больше, полученный результат означает, что несмещенная оценка величины параметра E при сплошном отборе может быть получена при длительности накопления исследуемого разреза от 75000 лет и больше.

5. ВЛИЯНИЕ ОСРЕДНЕНИЯ ПАЛЕОМАГНИТНОЙ ЗАПИСИ НА ОЦЕНКУ ВЕЛИЧИНЫ ПАРАМЕТРА S_p

Слой, отвечающий по мощности размеру стандартного палеомагнитного образца (~ 2 см), может накапливаться в разных обстановках за время от нескольких десятков до нескольких тысяч лет. Широко известно, что в осадочных породах палеомагнитная запись может формироваться продолжительное время вследствие, например, уменьшения порового пространства или формирования аутогенных минералов при диагенезе. Таким образом, палеомагнитная запись в образце осадочных пород не является “мгновенным снимком” геомагнитного поля, но, напротив, всегда усреднена. Соответственно, при изучении вековых вариаций по осадочным породам необходимо понимать, в какой степени осреднение

палеомагнитной записи в них может приводить к искажению определяемых параметров вековых вариаций.

В рамках настоящей работы нами было выполнено моделирование искажения палеомагнитной записи за счет осреднения и рассмотрено, как такое искажение влияет на оценку амплитуды вековых вариаций (параметра S_p).

Моделирование выполнялось следующим образом:

1. По методу [Хохлов, 2012] и с использованием модели ТК03 для географической точки с широтой 0° генерировалось 1000 реализаций временных последовательностей склонения и наклонения (D и I), каждая из которых включала 1000 точек с интервалом между точками либо 25, либо 200 лет. Для каждой реализации рассчитывался параметр S_p , после чего определялось среднее значение S_p для тысячи реализаций.

2. Затем для каждой реализации проводилось усреднение скользящим временным окном с длиной 200, 400, 800, 1600 и 3200 лет; после этого для каждого осреднения (временного окна) снова выполнялся расчет S_p для каждой реализации и расчет среднего S_p для 1000 реализаций.

3. Затем такой же расчет проводился для географических точек с широтами 5° , 10° и т.д. до 85° ; По результатам расчета для каждого осреднения строилась зависимость среднего значения S_p от широты.

Результаты выполненных расчетов показаны на рис. 3. Из рисунка ясно видно, что осреднение сигнала оказывает заметное влияние на определяемую величину S_p . Это влияние становится существенным уже при длительности осреднения порядка 400 лет, когда величина расчетного разброса S_p уменьшается по сравнению с S_p , полученным по неискаженной записи, на величину сравнимую с обычной шириной 95% доверительного интервала, определяемого при изучении амплитуды PSV [например, Johnson et al., 2008; Pavlov et al., 2019].

Очевидно, что при величине осреднения сигнала в осадочном разрезе больше 800 лет исследование такого разреза на предмет изучения амплитуды вековых вариаций путем простого расчета S_p лишается всякого смысла, поскольку не только расчетные значения S_p , но и верхние границы их доверительных интервалов будут существенно занижены по сравнению с истинными значениями.

Между тем информация об амплитуде PSV может быть извлечена из осадочного разреза даже с относительно высокой степенью осреднения палеомагнитной записи (например, при осреднении ~ 3200 лет) при условии, если имеются какая-

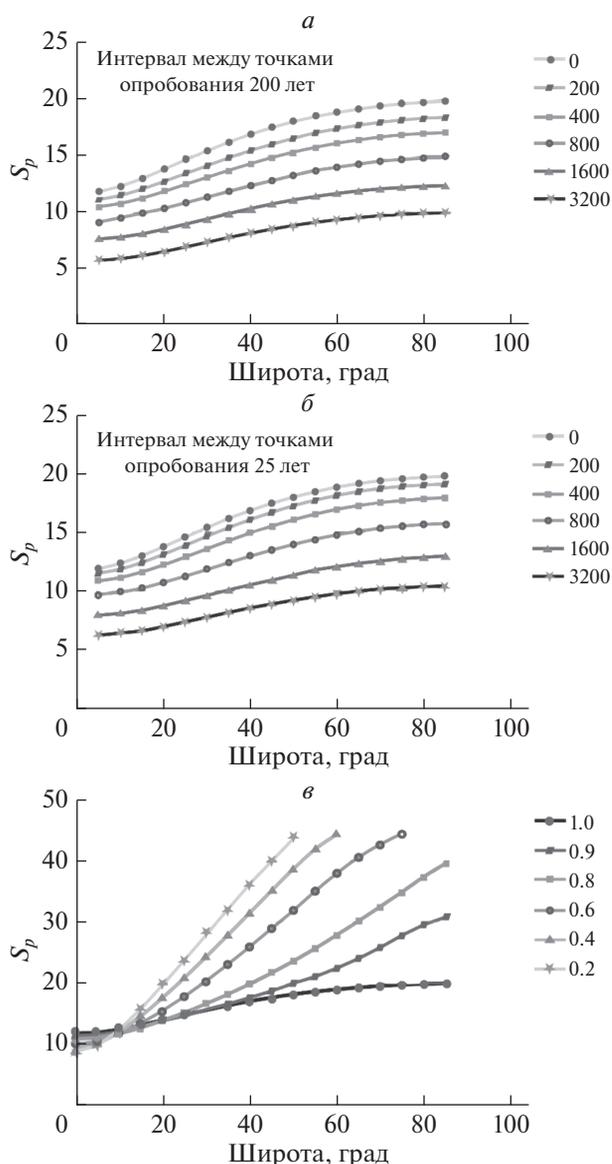


Рис. 3. (а, б) – Влияние осреднения на величину параметра S_p ; (в) – влияние степени занижения наклона f на широтную зависимость параметра S_p . Разные линии отвечают различным значениям параметра f , как показано на врезке.

либо априорная информация о степени осреднения сигнала. Например, если осреднение связано с сезонным смачиванием осадка, то такую информацию можно получить исходя из глубины сезонного смачивания. И, наоборот, если величина S_p для данного геологического времени и для данной широты известна (что можно считать справедливым для последних 5 млн лет), тогда по величине разброса S_p , измеренного в конкретном разрезе, можно судить о степени осреднения палеомагнитного сигнала в этом разрезе.

Отметим, что при увеличении шага отбора от 25 до 200 лет, влияние осреднения на уменьшение параметра S_p несколько усиливается. Например, если при шаге отбора 25 лет на широте 40° осреднения 200, 400, 800, 1600 и 3200 лет занижают величину S_p соответственно на 0.8, 1.9, 3.9, 6.2 и 8.3° , то при шаге отбора 200 лет такие же осреднения приводят к занижению параметра S_p на 1.4, 2.7, 4.5, 6.6 и 8.7° .

6. ВЛИЯНИЕ ЗАНИЖЕНИЯ НАКЛОНЕНИЯ В ПАЛЕОМАГНИТНОЙ ЗАПИСИ НА ОЦЕНКУ ВЕЛИЧИНЫ ПАРАМЕТРА S_p

Оценка влияния занижения наклона на величину параметра S_p выполнена по следующему алгоритму:

1. По методу [Хохлов, 2012] и с использованием модели ТК03 для широты 0° генерировалось 1000 реализаций временных последовательностей склонения и наклона (D и I), каждая из которых включала 1000 точек с интервалом между точками 200 лет. Для каждой реализации рассчитывался параметр S_p , после чего определялось среднее значение S_p для тысячи реализаций.

2. Затем в каждой реализации выполнялось занижение наклонов, отвечающее последовательно значениям параметра f равным 0.9, 0.8, 0.6, 0.4 и 0.2.

3. После этого для каждой реализации снова выполнялся расчет S_p , а для 1000 реализаций рассчитывалось среднее значение S_p .

4. Затем такой же расчет проводился для географических точек с широтами 5° , 10° и т.д. до 85° ; По результатам расчета для каждой величины занижения наклона строилась зависимость среднего значения S_p от широты.

Результаты выполненных расчетов показаны на рис. 3.

Из рисунка 3 видно, что при широтах меньших $\sim 10^\circ$ занижение наклонов приводит к слабому уменьшению разброса S_p ; в интервале широт 10° – 20° по мере уменьшения величины f разброс VGP сначала немного уменьшается, затем быстро увеличивается; наконец, на широтах больших 20° уменьшение величины f приводит к быстрому росту параметра S_p . Это увеличение идет тем быстрее, чем выше широта: на высоких широтах, даже при небольших занижениях наклона параметр S_p значительно увеличивается; в средних широтах влияние занижения наклона слабее.

Уменьшение параметра S_p при увеличении степени занижения наклона в интервале широт 0° – 10° отражает большую скорость сужения

распределения палеомагнитных направлений по оси юг–север при занижении наклонов в этой области широт, по сравнению со скоростью его расширения вдоль оси восток–запад.

7. ВЛИЯНИЕ ОСРЕДНЕНИЯ ПАЛЕОМАГНИТНОЙ ЗАПИСИ НА ОЦЕНКУ ВЕЛИЧИНЫ ПАРАМЕТРОВ E И D_{V_2}

В работах [Tauxe and Kent, 2004; Tauxe et al., 2008] рассмотрен вопрос о влиянии занижения наклона на оценку величин параметров E и, отчасти, D_{V_2} , характеризующих форму (удлинение, вытянутость) и ориентацию распределений палеомагнитных направлений. Установленные при этом закономерности в настоящее время широко используются при коррекции занижения наклона в палеомагнитной записи, что имеет значение для решения широкого круга геологических и геофизических задач.

Однако вопрос о том, как изменяются удлинение распределения палеомагнитных направлений и его ориентация (параметры E и D_{V_2}) при осреднении записи вариаций геомагнитного поля в осадочных разрезах до сих пор остается не изучен.

Разберем этот вопрос в рамках стратегии непрерывного (сплошного) отбора образцов. Для этого:

1. Для широты 0° генерируется исходная серия из 1000 реализаций с шагом 200 лет длительностью 1000 точек (шагов), что соответствует длине рассматриваемого интервала 200 000 лет.

2. Для каждой реализации рассчитывается параметр E и собственные векторы, после чего вычисляется средний параметр E по серии, его доверительный интервал, а также средние направления собственных векторов.

3. Выполняется осреднение исходной серии со скользящими окнами 400, 600, 800, 1000, 1200, 1600, 2000, 2400, 3200, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000 лет.

4. Для каждой новой серии, соответствующей каждому конкретному усреднению определяется параметр E и собственные векторы, после чего рассчитываются средний параметр E по серии, его доверительный интервал, а также средние направления собственных векторов.

5. Такие же вычисления производятся для широт 5° , 10° , 15° ... 85° и для количества точек (шагов) 200 и 5000 (что соответствует длинам рассматриваемых интервалов 40 000 и 1 000 000 лет).

Полученные результаты (рис. 4), показывают, что при непрерывном отборе усреднение приводит, как правило, к увеличению значений параметра E .

Усреднение может оказывать значительное (по сравнению с погрешностью определения –

см. ниже) влияние на величину параметра E . Это влияние слегка уменьшается с увеличением широты и заметно уменьшается с увеличением длины ряда. Рисунок 5 иллюстрирует последнюю зависимость для широты экватора.

В то время как при длине ряда 40000 лет параметр E при усреднении с окном 8000 лет увеличивается от 3.4 до 8, при длине ряда 1 млн лет при том же усреднении степень удлинения распределения палеомагнитных направлений меняется от ~ 2.9 до ~ 3.2 .

Интересно отметить, что стабилизация влияния осреднения на величину параметра E происходит на тех же интервалах времени (700–800 тыс. лет), что и стабилизация самого параметра E (см. рис. 2).

Выполненные расчеты показывают, что среднее по 1000 реализаций направление D_{V_2} удлинения (вытянутости) распределения палеомагнитных направлений на всех широтах не изменяется с увеличением степени осреднения и всегда направлено по оси Юг–Север.

8. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРИМЕРЫ ИХ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Можно ли по измеренным параметрам определить, отражают ли в действительности вариации палеомагнитной записи в разрезе геомагнитные вариации?

В большинстве работ, посвященных изучению палеомагнитных вариаций по палеомагнитным записям в осадочных разрезах, по умолчанию предполагается, что фиксируемые в разрезе вариации склонения и наклонения отражают вариации геомагнитного поля. Однако, принимая во внимание, что изменения склонения и наклонения могут быть связаны также и с другими факторами, такими, например, как изменение направления течений, изменение размера и формы поступающих в осадок магнитных зерен, биотурбация, механические напряжения и др., такое предположение представляется далеко не очевидным и, соответственно, требующим проверки. Для пород, формировавшихся в течение последних 5 млн лет, такая проверка может состоять в сравнении значений параметров S_p , E , D_{V_2} , определенных по палеомагнитной записи, со значениями этих параметров достаточно хорошо известными для геомагнитного поля этого времени. Такой подход используют, например, авторы работы [Zhu et al., 2000], сравнивая величину определенного ими для лессового разреза Лингтай (юго-запад Китайского лессового плато) параметра S_p , со значениями, рассчитанными по данным о вековых вариациях

за последние 5 млн лет [McElhinny and McFadden, 1997].

Выполненные нами модельные расчеты показывают, что такое сравнение может быть корректным, только при соблюдении важного условия, а именно: длина интервала времени, для которого определяется параметр S_p , должна быть не менее 25–30 тыс. лет. При этом допустимое отклонение между значениями измеренного и ожидаемого параметров зависит от широты и количества использованных образцов.

Например, для широты 408° и количества образцов 100 при условии неискаженной записи такое отклонение не должно превышать 3.1° – 3.6° (рис. 1). Если измеренный параметр S_p отклоняется в меньшую сторону от соответствующей границы – это может указывать на заметное осреднение палеомагнитной записи. Отклонение в большую сторону может быть связано с занижением наклонения. Последнее предположение, впрочем, легко проверяется сравнением измеренного среднего наклонения с наклонением, рассчитанным для этой широты по дипольной формуле [Храмов и др., 1982]. Если занижения наклонения нет, а разброс VGP значительно больше ожидаемого, этот факт следует рассматривать как прямое указание на то, что палеомагнитная запись в исследуемом разрезе существенно искажена.

Наши расчеты показывают, что параметр E также, в принципе, может быть использован для оценки адекватности палеомагнитной записи. При этом, однако, для корректного сравнения с ожидаемым значением, расчетное значение этого параметра должно быть получено не менее чем по 750 стратиграфическим уровням. И даже при таком большем количестве образцов достоверный интервал для расчетного значения S_p остается довольно широким для проведения точного сравнения. Например, для числа образцов 750 и шаге отбора 200 лет 95% достоверный интервал для величины параметра E будет лежать между 1.2 и 1.8 (рис. 2), что соответствует ожидаемой (из модели ТК03) величине этого параметра для интервала широт $\sim 30^\circ$ – 85° (рис. 4).

В том случае, если в разрезе отсутствует или невелико осреднение палеомагнитной записи, для оценки ее адекватности геомагнитному сигналу возможно также использование склонения промежуточного собственного вектора D_{V_2} . Наши расчеты показывают, что при отсутствии осреднения при определении этого параметра по коллекции, представляющей 1000 стратиграфических уровней, взятых с шагом 200 лет, его значения с 95% вероятностью будут лежать в интервале от $+21^\circ$ до -21° , т.е. достаточно определенно будут указывать на ориентацию вытянутости рас-

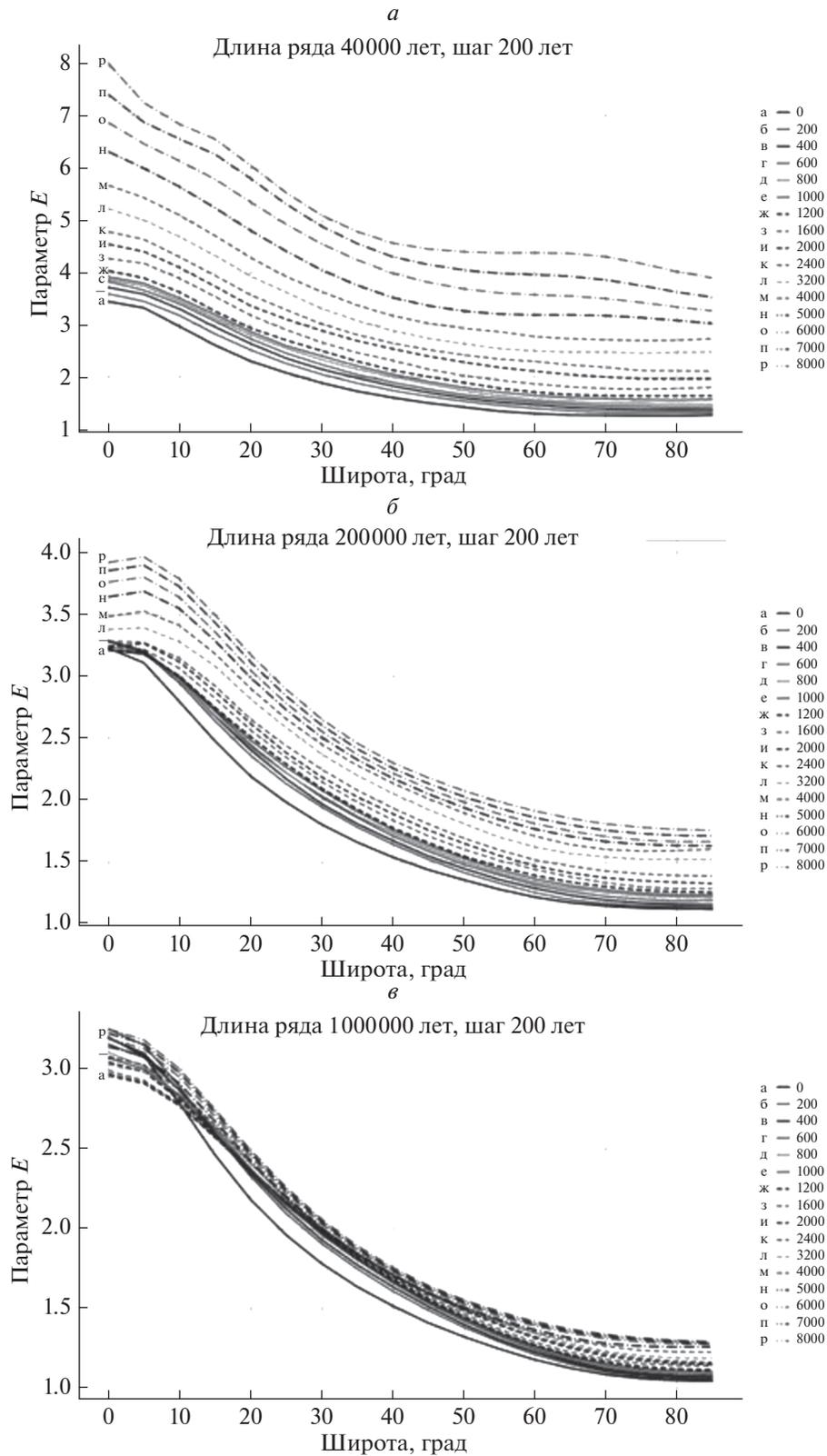


Рис. 4. Влияние степени осреднения на величину параметра E для разных длин опробованного интервала для разных широт (сплошной отбор, коррелированные данные). (*a*) — длина ряда 40000 лет; (*б*) — длина ряда 200000 лет; (*в*) — длина ряда 1000000 лет. На врезках (а–р) — уровни осреднения в годах.

пределения палеомагнитных направлений вдоль оси юг–север. Именно такая ориентации вытянутости должна наблюдаться в случае записи геомагнитных вариаций.

Однако пригодность этого параметра для тестирования адекватности палеомагнитной записи быстро начинает снижаться по мере осреднения палеомагнитной записи. В случае осреднения с временным окном 1600 лет доверительный интервал расширяется до $+45^\circ \dots -45^\circ$, при большем усреднении вероятность попадания измеренного склонения D_{V_2} в северную четверть стереограммы становится меньше 95% (рис. 5).

Вероятность же попадания в тот же интервал склонений, что и при отсутствии осреднения (от $+21^\circ$ до -21°) быстро уменьшается и уже при окне осреднения 3200 лет эта вероятность составляет порядка 50% (см. рис. 5).

8.1. Оценка перспективности разреза Хонако-2 для изучения геомагнитных экскурсов

Данные, полученные в настоящей работе, могут быть использованы, в частности, для оценки перспективности конкретных осадочных разрезов для поиска в них записей геомагнитных экскурсов. Отбор коллекций и их обработка с целью поиска записей геомагнитных экскурсов представляет собой очень трудозатратную и часто безуспешную работу, поэтому оценка перспективности осадочных разрезов с этой точки зрения имеет, очевидно, большое значение.

Представляется, что такая оценка может быть выполнена по следующему алгоритму:

1. По рекогносцировочной относительно небольшой (20–50 образцов) коллекции образцов, для данного разреза определяют величину S_p ;

2. Эту величину сравнивают с ожидаемой величиной разброса S_p для данной широты (ее можно определить по верхней кривой на рис. 3) и по результатам сравнения оценивают величину осреднения сигнала.

3. Используя метод [Хохлов, 2012] 1000 раз моделируют запись вариаций с наложенной на нее модельной записью возможного экскурса.

4. Усредняют каждую из 1000 реализаций с данной величиной осреднения (скользящего временного окна).

5. Определяют долю реализаций, в которой после осреднения все еще остается запись модельного экскурса. Эта доля и будет определять вероятность нахождения искомого экскурса в данном конкретном разрезе.

В качестве примера мы выполнили подобное исследование на разрезе Хонако-2 – одного из серии почвенно-лессовых разрезов юга Таджикистана, представляющих собой уникальный

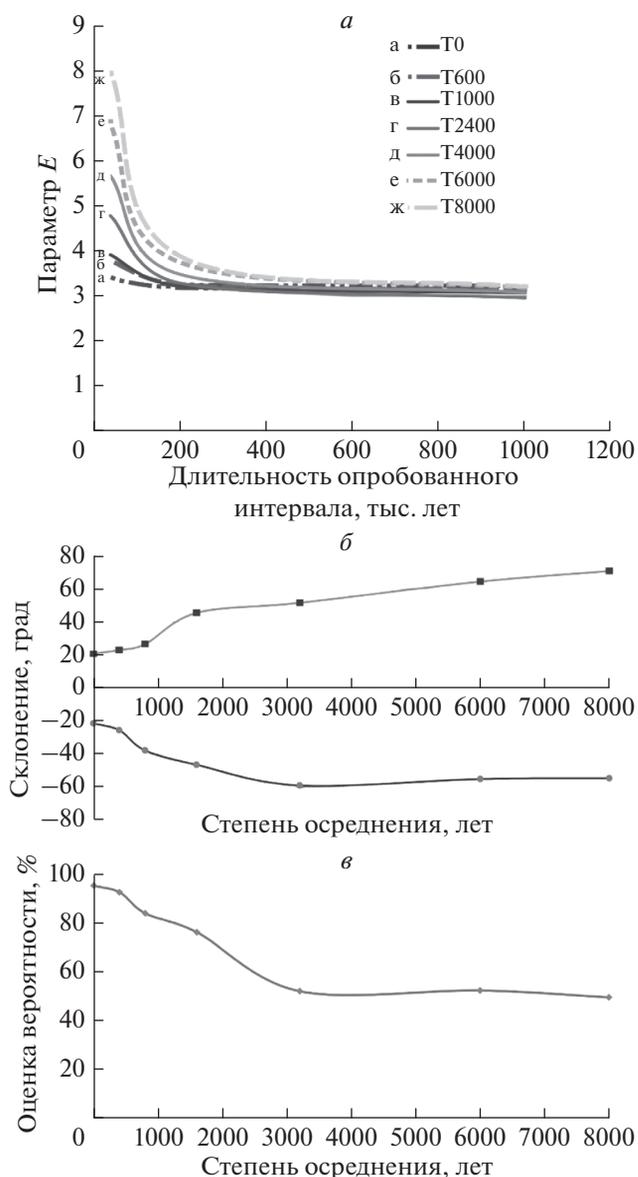


Рис. 5. (а) – Влияние степени осреднения на величину параметра E для разных длин опробованного интервала (широта -0° , сплошной отбор, коррелированные данные); (б, в) – влияние осреднения палеомагнитной записи на ширину 95% доверительного интервала определения склонения промежуточного собственного вектора D_{V_2} (верхний график) и на вероятность попадания значения склонения D_{V_2} в интервал склонений $+21^\circ \dots -21^\circ$ (нижний график). Верхняя и нижняя линии на графике (б) показывают, соответственно, верхнюю и нижнюю границы 95% доверительного интервала.

палеогеографический архив, несущий в себе информацию об изменениях климата на протяжении последних десятков и сотен тысяч лет. Эти объекты крайне интересны также и для археологических исследований [Ранов и Шеффер, 2000], поскольку в них присутствует ряд уровней с куль-

турными горизонтами, содержащими каменные орудия и отражающими историю расселения древнего человека в Евразии. Детальное изучение этих объектов требует, среди прочего, также постановки магнито-стратиграфических исследований, которые необходимы для получения независимых ограничений на возраст различных интервалов этих разрезов.

Такие ограничения, в частности, могут быть получены при обнаружении в разрезах записей геомагнитных экскурсов, возраст которых часто бывает хорошо известен. Если же запись экскурса достаточно детальна, это дает также возможность описать морфологию экскурса, что имеет большое значение для развития теории геомагнетизма. Здесь и далее подразумевается, что при поисках записи экскурсов в разрезах будет проводиться сплошной отбор образцов.

Лессово-почвенный разрез Хонако-2 (38.4° N, 70.1° E), расположен в 7 км северо-восточнее поселка Ховалинг, центра одноименного административного района (рис. 6). Этот разрез входит в состав протянувшегося более чем на два километра лессово-почвенного обнажения, наиболее глубокие вскрытые горизонты которого имеют возраст ~1.5 млн лет [Додонов, 2002]. По данным разных авторов [Додонов и Ранов, 1984; Ранов и Шеффер, 2000] в разрезе содержится от 12 до 24 палеопочв, разделенных горизонтами лессов. Мощность обнажения превышает 180 м.

В ходе рекогносцировочных полевых работ 2019 года нами были опробованы породы верхней части разреза Хонако-2 (рис. 7), мощностью 40.8 м. Почвенные горизонты (педокомплексы 1 и 2), выделяемые на этом интервале, соответствуют этапам потепления, отвечающим кислородно-изотопным стадиям MIS-5 и MIS-7 [Додонов, 2002]. Возраст верхних и нижних границ этих стадий, соответственно 100–130 и 180–243 тыс. лет [Lisiecki, Raymo, 2005]. В разрезе не отмечается наличия выраженных перерывов, однако имеется несогласие в районе ПК-10 (возрастом около 900 тыс. лет) [Додонов, 2002].

Исходя из этих оценок, мы можем считать, что в среднем скорость накопления опробованного интервала разреза составляет чуть более 15 см за 1000 лет. Поскольку размер нашего образца и потери при распиловке отвечают, соответственно, примерно 2 и 1 см мощности, получаем, что на 1000 лет мы можем отобрать в среднем порядка 5 образцов.

Просто за счет того, что каждый образец накапливался со времени в среднем 2 см/15 см × × 1000 лет = около 150 лет, в нем уже автоматически происходит осреднение записи за это время. Скорость вариаций в эпохи относительно стабильного состояния поля в среднем составляют 2°–3° за столетие [Chenet et al., 2008], во время

экскурсов эти скорости могут возрасти в несколько раз. Принимая во внимание, что точность определения палеомагнитного определения для стратиграфического уровня, как правило, не лучше 3°–4°, а масштабы изменений склонений и наклонений во время экскурсов составляют многие десятки градусов, такое осреднение, очевидно, не может привести к “затираанию” экскурса в палеомагнитной записи. Однако вопрос о том, сохранится ли запись экскурса при больших временах осреднения, требует своего изучения. На первых (сверху) 20 метрах мощности опробование разреза осуществлялось с интервалом 20 см, на последующих 20.8 м – с интервалом 50 см. С каждого уровня отбиралось по 2–3 независимо ориентированных образца.

В лаборатории главного магнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН все образцы были подвергнуты детальной очистке переменным магнитным полем. По результатам очистки в образцах были выделены характеристические компоненты намагниченности, после чего для каждого уровня были определены средние палеомагнитные направления. По этим направлениям отдельно для лессовых и почвенных горизонтов были рассчитаны виртуальные геомагнитные полюсы, для которых были определены значения параметра S_p . Результаты этих расчетов приведены в таблице 1. Отметим, что длительность накопления каждого горизонта и количество использованных для определения S_p образцов (за исключением второго почвенного горизонта) достаточны для получения несмещенной оценки S_p .

Как видно из табл. 1, величины S_p в почвах не меньше, чем в лессах, что представляется несколько неожиданным, поскольку многими исследованиями показано, что, по сравнению с лессами, в почвах широко развиты аутигенные процессы, приводящих к образованию новых магнитных минералов [Heller et al., 1991]. Поскольку эти процессы могут идти длительное время, естественно было бы ожидать большего осреднения вариаций и, соответственно, меньшие значения S_p в почвах по сравнению с лессами. В нашем разрезе мы этого не видим, что можно объяснить, например, предположив, что аутигенные минералы в рассматриваемых почвах представлены, главным образом, суперпарамагнитными зернами, не вносящими сколько-нибудь заметный вклад в палеомагнитную запись.

Интересно также, что амплитуда вариаций палеомагнитных направлений, записанных в верхних двух горизонтах разреза, значительно больше, чем в нижних двух. Поскольку на настоящий момент нет никаких свидетельств в пользу того, что вековые геомагнитные вариации в плейстоцене существенно изменяли свою амплитуду, мы

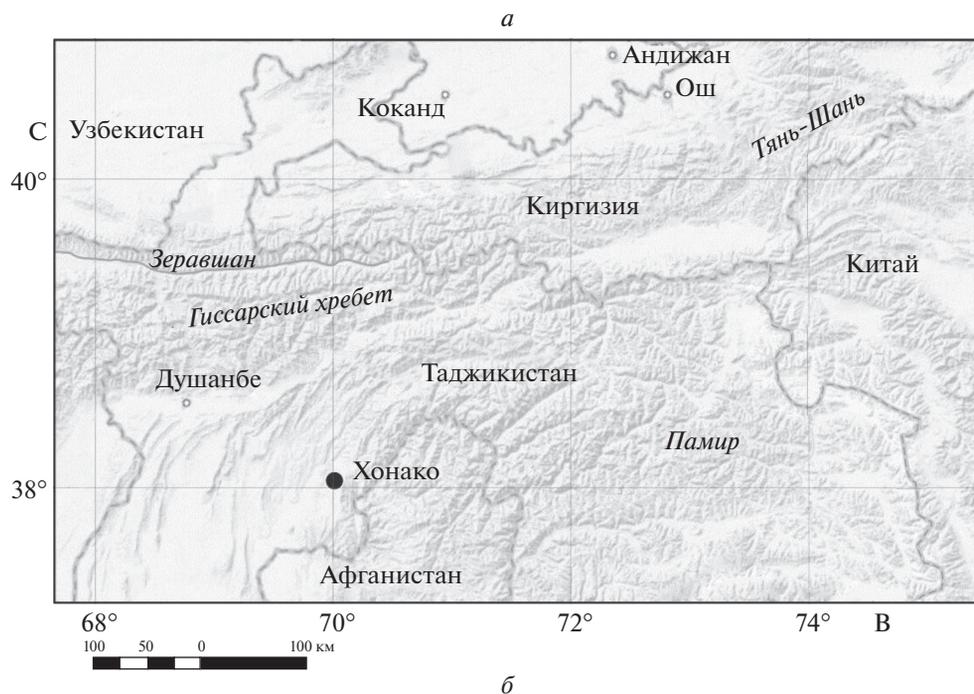


Рис. 6. (а) – Географическое положение разреза Хонако-2; (б) – общий вид разреза Хонако-2.

рассматриваем это различие как прямое указание на то, что на разных уровнях почвенно-лессовых разрезов степень осреднения записи вековых вариаций может существенно меняться, как в лесах, так и почвах.

На широте разреза Хонако-2 ожидаемая величина S_p должна составлять около 16.9° [Tauxe and Kent, 2004; Johnson et al., 2008]. Параметр S_p ,

определенный для четырех изученных горизонтов разреза Хонако-2, значительно меньше (см. табл. 1). Это результат указывает на то, что палеомагнитная запись в рассматриваемых горизонтах заметно усреднена. Исходя из рис. 2 такое осреднение для первого и второго лессовых горизонтов и для почвенного горизонта 1 может быть оценено соответственно следующими временными окнами осреднения: ~ 1100 , ~ 3000 и ~ 800 лет.

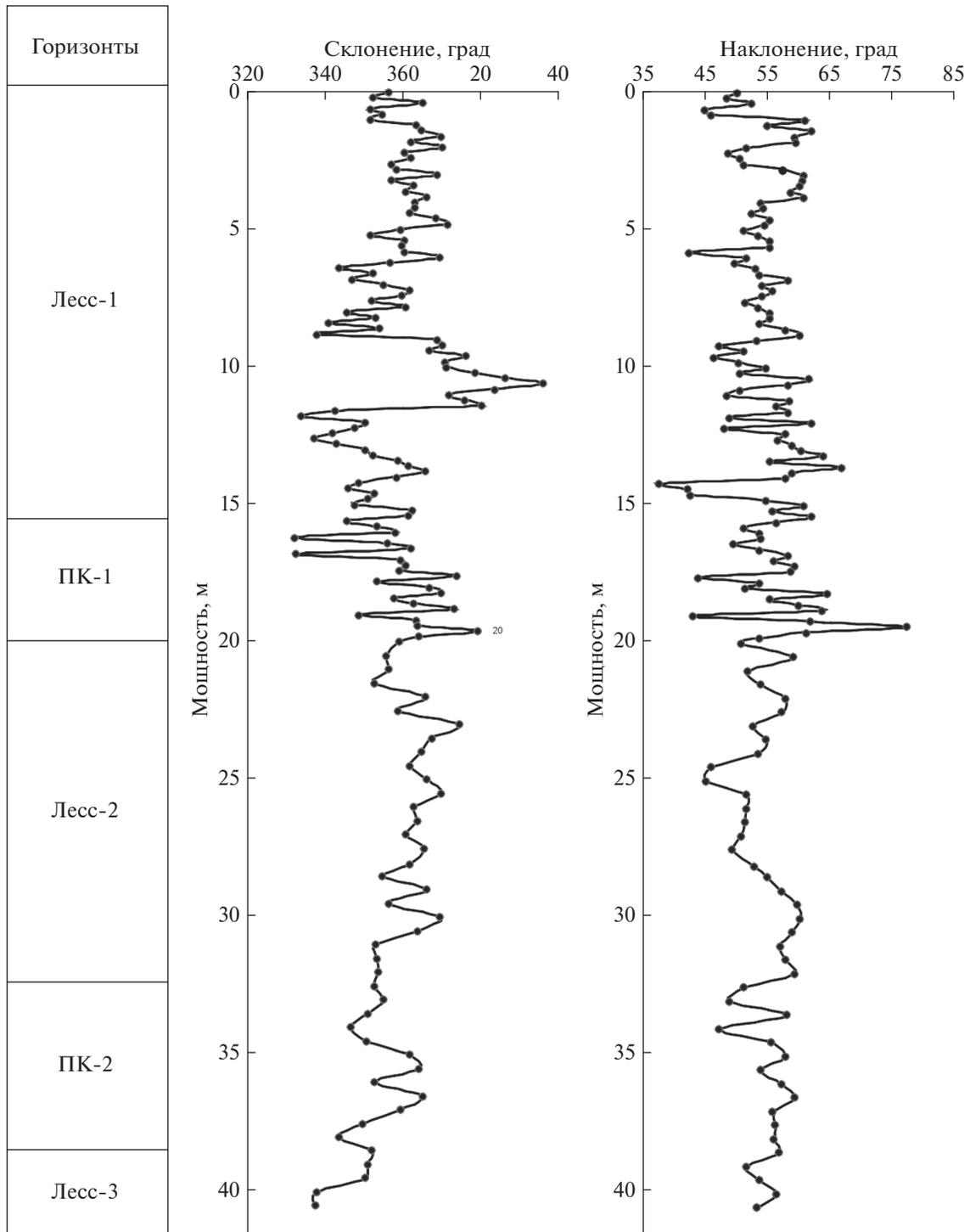


Рис. 7. Палеомагнитная запись в верхней части разреза Хонако-2.

Для того, чтобы оценить, как такие осреднения могут влиять на сохранность в разрезе записей экскурсов, нами было выполнено численное моделирование согласно алгоритму, описанному выше.

В качестве основы для моделей экскурсов мы использовали реальные записи экскурсов Лашамп и Блэйк [Nowaczyk et al, 2012; Osete et al., 2012]. Первый из них (LCH) представляет “простой” тип экскурса, для которого характерно от-

Таблица 1. Палеомагнитные данные, полученные по разрезу Хонако-2

Стратиграфический уровень	Мощность (см)	Интервал разреза (см)	Оценка длительности накопления (лет)	Интервал отбора (см)	N	D	I	K	$\alpha 95$	cut-off	Sp/Spmin/Spmax	E	D_{V_2}	f
Лессовый горизонт 1	1550	0–1550	~36000	20	78	359.2	54.8	87.7	1.7	45	11.2/9.9/12.5	1.5	281.5	0.89
Почвенный горизонт 1	450	1550–2000	~28000	20	22	358.3	56.7	69.6	3.7	45	12.5/8.9/15.7	1.4	334.4	0.96
Лессовый горизонт 2	1230	2000–3230	~82000	50	25	1.5	54.2	221.2	2.0	45	7.4/6.2/8.6	2.1	32.7	0.87
Почвенный горизонт 2	650	3230–3880	~43000	50	14	351.2	54.7	198.2	1.9	45	8.3/6.0/10.5	2.0	300.4	0.90

Примечание: D , I – склонения и наклонения, рассчитанные для каждого стратиграфического уровня (получены усреднением данных по 2–3 образцам с каждого уровня); K , $\alpha 95$ – кучность и радиус 95%-го круга доверия; E , f , D_{V_2} – параметры вековых геомагнитных вариаций (см. пояснения в тексте); f – коэффициент занижения наклонения; N – число стратиграфических уровней, используемых для расчета D , I , K , $\alpha 95$, S_p , E , f , D_{V_2} .

носителем регулярное смещение VGP от полярных широт северного полушария в высокие широты южного полушария и такое же регулярное смещение VGP обратно в северные полярные широты. Второй пример (BLK) отвечает условно “сложному” типу экскурса с нерегулярными скачками VGP и с возвратно-поступательными движениями.

Согласно алгоритму, описанному выше, нами были смоделированы записи вариаций (4 серии по 1000 реализаций в каждой). В середину реализации каждой серии была вставлена модельная запись экскурса одного из четырех типов: “простого длительного – LCH-8”, “простого- короткого- LCH-2”, “сложного длительного- BLK-8” и “сложного короткого- BLK-2”. До настоящего времени продолжительность экскурсов является предметом острых дискуссий. Поэтому для “длительного” и “короткого” типов экскурсов мы выбрали длительности 8 и 2 тысяч лет: длительности примерно отвечают верхней и нижней границам временного интервала, куда наиболее часто попадают приводимые в разных работах оценки [Laj and Channell, 2007].

Шаг в реализации был выбран таким образом, чтобы он отвечал такому интервалу времени в разрезе, которому примерно соответствует один образец – ~200 лет (см. выше). Длина реализации должна быть не меньше длительности экскурса плюс, по крайней мере, две (1 сверху и 1 снизу) длины максимального интервала осреднения.

Исходя из этих соображений, длина каждой реализации была выбрана в 20000 лет.

Затем реализации каждой серии были усреднены с окнами осреднения 400, 600, 800, 1000, 1200, 1600, 2000, 2400, 3200 лет – для коротких типов экскурсов, и далее 4000, 5000, 6000, 7000 и 8000 лет – для длительных типов экскурсов.

Далее, для каждой серии было подсчитана доля записей (реализаций), в которых после усреднения сохраняется запись экскурса. Запись экскурса считалась сохраненной, если на том интервале, где исходно был записан экскурс, сохранялось, по крайней мере, 3 точки, которым соответствовали VGP с широтами менее 45°.

Полученные результаты представлены на рис. 8. Как и следовало ожидать, вероятность обнаружения экскурсов в рассматриваемом разрезе (и в других разрезах с близкими скоростями осадконакопления) существенно зависит от длительности экскурса, его формы и степени усреднения палеомагнитной записи.

Выполненные расчеты показывают, что в разрезе Хонако-2 даже при отсутствии усреднения палеомагнитной записи вероятность обнаружения записи сложного короткого экскурса типа BLK-2 составляет всего около 25%. С появлением усреднения эта вероятность постепенно уменьшается и становится равной всего ~2% при усреднении с окном 3200 лет. Из рисунка 8 мы можем оценить вероятность нахождения экскурса типа BLK-2 в первом лессовом и в первом почвенном горизонтах величиной порядка 20%. Нахождение

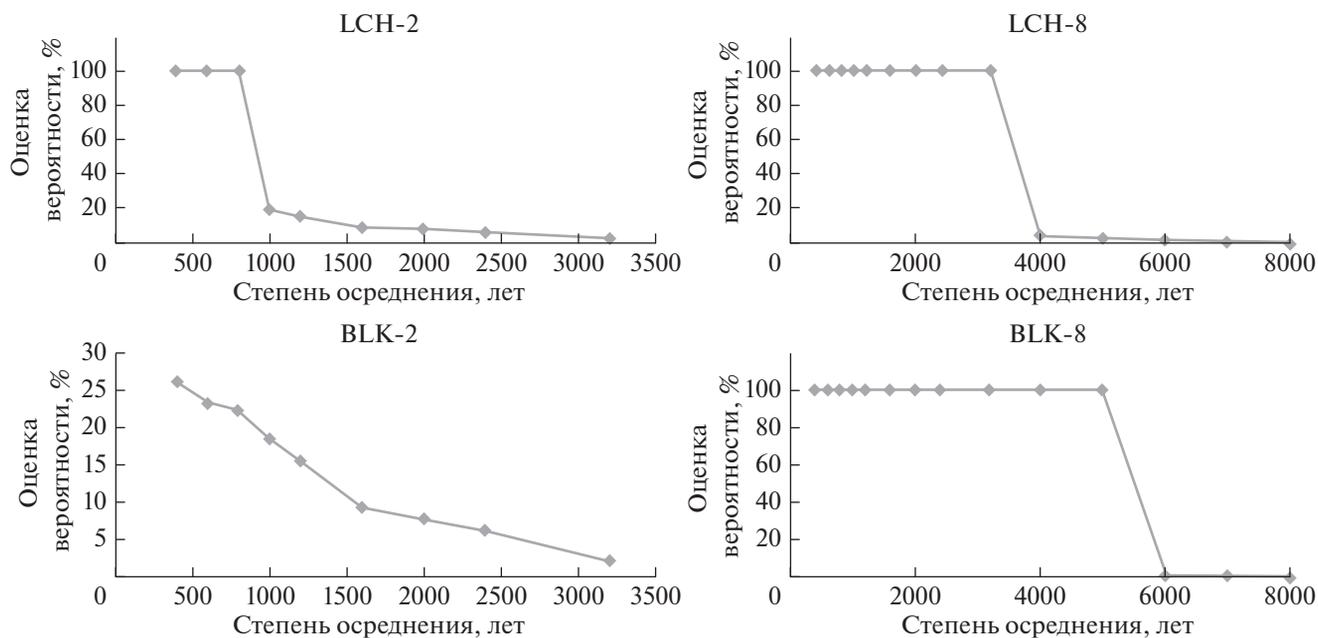


Рис. 8. Вероятность обнаружения геомагнитного экскурса в разрезе при различной степени осреднении палеомагнитной записи. Тип модельного экскурса указан на рисунке.

записи экскурса такого типа во втором лессовом горизонте практически невероятно.

Зависимость вероятности обнаружения простого короткого экскурса типа LCH-2 от степени усреднения имеет несколько другой характер. При относительно низких степенях усреднения палеомагнитного сигнала (до 1000 лет) запись экскурса будет обнаружена с очень высокой вероятностью. При большем усреднении вероятность обнаружения такого экскурса резко падает и становится меньше 5% при величинах усреднения больших 2400 лет. Полученные данные указывают на то, что экскурс типа LCH-2 с довольно большой вероятностью может быть обнаружен в почвенном горизонте 1 разреза Хонако-2. Вероятность обнаружения такого экскурса заметно отличается от нуля в первом лессовом горизонте (принимая также во внимание, что скорость осадконакопления в нем выше, чем средняя скорость осадконакопления, рассчитанная для всего разреза). Исходя из выполненных расчетов, нахождение экскурса такого типа во втором лессовом горизонте представляется маловероятным.

Как видно из рис. 8 вероятность обнаружения длительных экскурсов в разрезах остается большой вплоть до величин усреднения, соответствующих временам в первые тысячи лет. Впрочем, при больших временах усреднения (~4000 лет для “сложных” экскурсов и ~6000 лет – для “сложных”), эта вероятность очень быстро падает. Что касается разреза Хонако-2, то наши расчеты ука-

зывают на высокую вероятность нахождения в нем записей “длительных” экскурсов.

Полученная информация имеет большое значение для оптимального планирования полевых исследований. Например, согласно данным работы [Osete et al., 2012], “сложный” экскурс Блэйк имеет возраст около 115 тыс. лет и длительность ~4 тыс. лет. Исходя из имеющихся для разреза Хонако-2 оценок, этот экскурс должен быть записан в интервале, отвечающему первому почвенному горизонту. Степень усреднения палеомагнитной записи для этого горизонта нами оценена временным окном ~800 лет. С учетом данных, представленных на рис. 8 это означает, что постановке детальных работ с шагом отбора ~200 лет этот экскурс не должен быть пропущен.

Экскурс Лашамп имеет возраст ~41 тыс. лет и длительность порядка 2.2 тыс. лет [Nowaszyk et al., 2012], следовательно, мы можем ожидать наличие его записи в первом лессовом горизонте. Степень усреднения палеомагнитной записи в этом горизонте оценена выше временным окном ~1100 лет. Принимая во внимания данные расчетов, представленные на рис. 8, можно сделать вывод о том, что вероятность нахождения записи экскурса Лашамп в первом лессовом горизонте составляет менее 20%. Соответственно, поиски записи экскурса Лашамп в разрезе Хонако-2, с учетом необходимых для этого трудовых затрат, представляются вряд ли оправданными.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше мы рассмотрели, как усреднение геомагнитного сигнала при его записи в осадочных породах влияет на величину параметров S_p , E и D_{V_2} , определяемых по результатам исследований палеомагнитных коллекций, полученных в ходе сплошного отбора. Как показали наши модельные эксперименты, значения параметров S_p и E зависят не только от степени осреднения, но и от характеристик отбора — шага, с которым происходит опробование разреза и длительности (мощности) исследуемого интервала разреза.

Выполненное моделирование показывает, что, начиная с некоторой мощности (длительности накопления) исследуемого разреза, параметры S_p и E , а также доверительные интервалы их определения стабилизируются, т.е. практически перестают изменяться. Именно эти значения мощности (длительности осадконакопления) определяют минимальные интервалы, которые необходимо изучить, чтобы получить несмещенные оценки амплитуды вековых вариаций и степени вытянутости распределения палеомагнитных направлений. Для параметра S_p эта минимальная длительность составляет ~25–30 тыс. лет, для параметра E — ~75000 при шаге отбора 100 лет и ~150000 лет при шаге отбора 200 лет.

Увеличение степени осреднения палеомагнитной записи на всех широтах всегда приводит к занижению параметра S_p и, как правило, к увеличению параметра E . При этом важно отметить, что масштаб влияния осреднения на эти параметры может зависеть от характеристик отбора: шага отбора и длительности исследуемого интервала.

В ходе проведенной работы изучено также влияние занижения наклона на параметр S_p и показано, что величина и направление этих изменений зависят не только от степени занижения наклона, но также, в значительной степени, от широтного положения исследуемого разреза.

Выполненные расчеты позволяют оценить, в какой мере измеряемые по отобраным в ходе сплошного отбора коллекциям параметры S_p , E и D_{V_2} могут быть использованы для решения вопроса о том, действительно ли изменения палеомагнитных направлений в данном осадочном разрезе отражают палеомагнитные вариации. Показано, что все три параметра могут быть полезны для решения этой задачи, однако, только параметр S_p может быть относительно точно оценен по пилотной небольшой коллекции. Для получения с необходимой точностью величин параметров E и D_{V_2} требуется отбор коллекций объемом во многие сотни образцов, что, естественно, существенно понижает ценность

этих параметров для прогнозирования перспективности тех или иных разрезов. С другой стороны, эти параметры могут быть полезны при оценке надежности палеомагнитной записи, уже полученной по объемной коллекции.

Используя данные выполненного моделирования, мы попытались оценить перспективность разреза Хонако-2 — одного из лучших лессовых разрезов Центральной Азии — для поиска записи в нем геомагнитных экскурсов. В результате были получены численные оценки вероятности нахождения каждого из четырех рассмотренных типов экскурсов на разных горизонтах верхней части разреза Хонако-2. Эти оценки указывают на малую вероятность нахождения в разрезе Хонако-2 экскурсов, длительность которых составляет первые тысячи лет, при этом вероятность нахождения экскурсов “простого” типа несколько больше, чем вероятность нахождения “сложных” экскурсов. При увеличении длительности экскурсов, вероятность их обнаружения вырастает и приближается к 100%, когда эта длительность начинает значительно (в разы) превышать характерные времена осреднения палеомагнитной записи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-47-0411 (численное моделирование, интерпретация результатов, подготовка статьи) и Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 18-00-00470 (полевые работы на разрезе Хонако-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Додонов А.Е. Четвертичный период Средней Азии // М.: Геос, 249 с. 2002.
- Додонов А.Е., Ранов В.А. Антропоген Средней Азии: стратиграфия, корреляция, палеолит // Четвертичная геология и геоморфология. 27-й МКГ. Т. 3. М.: Наука. С. 67–81. 1984.
- Ранов В.А., Шеффер Й. Лессовый палеолит // Археология, этнография и антропология Евразии. № 2(21). С. 20–32. 2000.
- Хохлов А.В. Моделирование вековых геомагнитных вариаций. Принципы и реализация // Геофиз. исслед. Т. 13. № 2. С. 50–61. 2012.
- Biggin A.J., van Hinsbergen D.J., Langereis C.G., Straathof G.B., Deenen M.H. Geomagnetic secular variation in the Cretaceous Normal Superchron and in the Jurassic // Phys. Earth Planet. In. V. 169. № 2. P. 3–19. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.07.004>
- Chenet A.L., Fluteau F., Courtillot V., Gérard 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.: Solid Earth. V. 113. B04101. 2008. <https://doi.org/10.1029/2006JB004635>

- Cox A. Latitude Dependence of the Angular Dispersion of the Geomagnetic Field // *Geophys. J. Roy. Astronom. Soc.* V. 20. № 3. P. 253–269. 1970.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1970.tb06069.x>
- Heller F., Meili B., Wang J., Li H., Liu T. Magnetization and Sedimentation History of Loess in the Central Loess Plateau of China // *Aspects of Loess Research*. Ed. Liu T. Beijing, China Ocean Press. P. 147–163. 1987.
- Hongre L., Hulot G., Khokhlov A. An analysis of the geomagnetic field over the past 2000 years // *Phys. Earth Planet. In.* V. 106. P. 311–315. 1998.
- Johnson C.L., Constable C.G., Tauxe L. et al. Recent investigations of the 0–5 Ma geomagnetic field recorded by lava flows // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. V. 9. Q04032. 2008.
<https://doi.org/10.1029/2007GC001696>
- King R.F. The remanent magnetism of artificially deposited sediments // *Geophys. J. Intern.* V. 7. P. 115–134. 1955.
- Korte M., Constable C., Donadini F., Holme R. Reconstructing the Holocene geomagnetic field // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 312. P. 497–505. 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.10.031>
- Laj C., Channell J. E. T. Geomagnetic excursions // *Treatise on Geophysics. Geomagnetism*. V. 5. Ed. Kono M., Elsevier, Amsterdam. P. 373–416. 2007.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E. A Pliocene–Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records // *Paleoceanography*. V. 20. PA1003. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2004PA001071>
- McElhinny M.W., McFadden P.L. Palaeosecular variation over the past 5 Myr based on a new generalized database // *Geophys. J. Intern.* V. 131. № 2. P. 240–252. 1997.
- Nowaczyk N.R., Arz H.W., Frank U. Kind J., Plessen B. Dynamics of the Laschamp geomagnetic excursion from Black Sea sediments // *Earth and Planetary Science Letters*. V. 351–352. P. 54–69. 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.06.050>
- Osete M. L., Martín-Chivelet J., Rossi C., Edwards R.L., Egli R., Muñoz-García M. B., Wang X., Pavón-Carrasco F.J., Heller F. The Blake geomagnetic excursion recorded in a radiometrically dated speleothem // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 353–354. P. 173–181. 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.07.041>
- Pavlov V.E., Fluteau F., Latyshev A.V., Fetisova A.M., Elkins-Tanton L.T., Black B.A., Burgess S.D., Veselovskiy R.V. Geomagnetic Secular Variations at the Permian-Triassic Boundary and Pulsed Magmatism During Eruption of the Siberian Traps // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. V. 20. № 2. P. 773–791. 2019.
<https://doi.org/10.1029/2018GC007950>
- Tauxe L., Kent D. 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 Internal Geomagnetic Field. Geophysical Monograph Series*. V. 145. Ed. Channell J.E.T., Kent D.V., Lowrie W., Meert J.G. AGU. P. 101–115. 2004.
- Tauxe L., Kodama K., Kent D.V. Testing corrections for paleomagnetic inclination error in sedimentary rocks: a comparative approach // *J. Phys. Earth Planet.* V. 169. P. 152–165. 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.05.006>
- Vandamme D. A new method to determine paleosecular variation // *J. Phys. Earth Planet.* V. 85. P. 131–142. 1994.
- Zhu R., Guo B., Pan Y., Liu Q., Zeman A., Suchy V. Reliability of geomagnetic secular variations recorded in a loess section at Lingtai, north-central China // *Sci. China Ser. D-Earth*. V. 43. № 1. P. 1–9. 2000.
<https://doi.org/10.1007/BF02877826>