

УДК 550.384

О ПОВТОРНОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАЛЕОНАПРЯЖЕННОСТИ В МЕЛУ ПО КОЛЛЕКЦИИ А.С. БОЛЬШАКОВА И Г.М. СОЛОДОВНИКОВА

© 2008 г. В. В. Щербакова, Г. В. Жидков, В. П. Щербаков

Геофизическая обсерватория "Борок", ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, пос. Борок (Ярославская обл.)

Поступила в редакцию 14.05.2008 г.

Обширный блок данных по палеонапряженности $H_{др}$, полученных ранее Большаковым А.С. и Солодовниковым Г.М., в современных компиляциях не принимается в расчет из-за отсутствия указаний на то, что авторами выполнялась процедура "check-points", благодаря которой отслеживаются химические изменения в породах в процессе экспериментов по определению $H_{др}$. В данной работе приводятся новые определения $H_{др}$, полученные методом Телье-Коэ, но с выполнением указанной процедуры "check-points", на образцах из коллекции армянских пород мелового возраста, по которой уже имеется публикация Большакова А.С. и Солодовникова Г.М. Новые результаты близки по величине к уже опубликованным и указывают на низкое значение геомагнитного поля в мелу, подтверждая тем самым гипотезу о низком значении палеополя в мезозое, которую выдвинули Большаков А.С. и Солодовников Г.М. По изученной коллекции дано подтверждение достоверности определений $H_{др}$ Большакова и Солодовникова.

PACS:91.25.Ng

ВВЕДЕНИЕ

Дискуссия о том, как ведет себя величина геомагнитного поля $H_{др}$ на протяжении всей истории Земли, ведется давно. Современные представления о происхождении земного поля и поведении его характеристик (напряженности и направлении) сильно ограничиваются количеством и качеством накопленных данных. Разными авторами порою высказываются взаимоисключающие гипотезы, и зависит это в значительной степени от того, какой блок данных принимается в расчет при анализе. Существующие базы данных [Perrin, Shcherbakov, 1997; Щербаков, Сычева, 2006; <http://www.brk.adm.yar.ru/palmag/index.html>, <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/seg/potrlid/paleo.html>] включают в себя все опубликованные определения $H_{др}$, которые различаются способами их получения и степенью достоверности. В то же время современный анализ базы данных начинается с селекции представленных в них результатов на основе существующих критериев достоверности (их обсуждение см., например, в статье [Щербакова, Щербаков, 2004]). Одним из них является выполнение процедуры "check-points": проведение повторных нагревов до более низких температур, что позволяет делать сравнение величин лабораторных $pTRM$ и отслеживать возможные химические изменения в процессе нагревов. В настоящее время в экспериментах по определению палеонапряженности такие нагревы делаются часто, например [Heunemann et al., 2004; Щербакова и др., 2005], через каждые два температурных шага

процедуры Телье, а значения "check-points" выводятся на график Араи-Нагата.

На сегодня базы данных по $H_{др}$ содержат порядка 3500 определений на всю временную геологическую шкалу (0–3500 Ма). Из них около трети принадлежат А.С. Большакову и Г.М. Солодовникову, которые исследовали изверженные породы и обожженные ими контакты. К сожалению, в работах Большакова А.С. и Солодовникова Г.М. нет четкого указания на то, делали они в своих экспериментах процедуру "check-points" или нет, соответственно, на графиках не показываются какие-либо проверочные точки, связанные с контролем химических изменений. Нужно отметить, однако, что фактически авторы выполняли похожую процедуру, а именно, после нагревов до 600°C делали повторный двойной нагрев до 300°C, на что есть указания в текстах статей, например: "В процессе нагревов наблюдаются высокая стабильность направления I_n , величин $dI_n(300^\circ)$ при повторных нагревах и магнитной восприимчивости" [Большаков, Солодовников, 1981]. Тем не менее, отсутствие в работах этих авторов процедуры "check-points" в ее нынешнем виде приводит к тому, что при анализе в современных компиляциях их данные часто отбрасываются [Tauxe, Staudigel, 2004; Selkin, Tauxe, 2000]. Как следствие, в интерпретации данных по фанерозою проявляется большая неопределенность. Так, анализ, проведенный в работах [Perrin, Shcherbakov, 1997; Щербаков, Сычева, 2006], с учетом определений Большакова А.С. и Солодовникова Г.М., выявляет явную бимодальность в значениях палеонапряженности за

период последних 300 млн. лет. Если же эти данные отбрасываются, картина становится неопределенной, и некоторые авторы ставят под сомнение “гипотезу низкого поля в мезозое”, и напротив, говорят о высоком значении поля в это время [Tauхе, Staudigel, 2004; Tarduno, Cottrell, 2005]. Таким образом, есть очевидная необходимость в подтверждении или опровержении блока данных Большакова А.С. и Солодовникова Г.И.

В последние годы исследователи из разных стран предприняли шаги по их проверке. Был сделан отбор коллекций на некоторых разрезах, по которым есть публикации указанных авторов, и проведено определение палеонаправлений и палеонапряженности с учетом всех современных требований к их достоверности. Результаты по сибирским траппам [Heupemann et al., 2004; Щербакова и др., 2005] и армянским контактам [Shcherbakova et al., in press] оказались очень близки к тем, что получили в свое время А.С. Большаков и Г.М. Солодовников на аналогичных объектах, и подтверждают таким образом достоверность их определений.

Здесь мы приводим результаты повторного определения $H_{др}$ на коллекции, по которой уже были опубликованы результаты Большаковым и Солодовниковым [1981]. Авторы являются сотрудниками Геофизической Обсерватории “Борок”, в которой десятки лет работали А.С. Большаков и Г.М. Солодовников и где были получены все опубликованные ими данные по $H_{др}$. В лаборатории сохранилось определенное количество свежих образцов-дублей, на которых мы провели комплекс экспериментов, прежде всего – процедуру Телье с выполнением “check-points”.

ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ И ЭКСПЕРИМЕНТА

Работы А.С. Большакова и Г.М. Солодовникова всегда отличала большая статистика: из каждого разреза отбирались многие сотни больших по объему ориентированных штуфов, из которых в Обсерватории выпиливалось максимальное количество больших кубиков с ребром 24 мм (для процедуры Телье) и маленькие 1-см-кубики для метода Вилсона и магнитных измерений. Далеко не весь материал был использован, в лаборатории сохранилось много свежих, оставшихся не гретыми, больших кубиков из тех коллекций, по которым уже опубликованы результаты. Используя сохранившиеся полевые дневники Г.М. Солодовникова, для наших экспериментов мы смогли отобрать достаточное количество образцов из армянской коллекции пород мелового возраста (Паравакар, потоки П-1, П-5, П-6 и П-9). Отобранные большие кубики были распилены на 4 маленьких с ребром 1 см, и именно с ними велась дальнейшая работа.

Коллекция отбиралась в Армении, на разрезе Паравакар, стратиграфический возраст пород – коньяк-сантон. Приведем краткое описание разреза, взятое из статьи [Большаков, Солодовников, 1981]: “Паравакарский разрез расположен в 12–15 км к северо-западу от Товузского разреза, недалеко от села Паравакар. В разрезе почти нет туфогенно-осадочных пород между потоками порфиритов, а если они и есть, то очень мало-мощные и не выдержаны по простиранию.

Исследованная часть Паравакарского разреза состоит в основном из потоков порфиритов, видимая мощность которых составляет 400–500 м. Образцы отбирались только из наиболее заметных по мощности потоков порфиритов, которые промаркированы снизу вверх от П-1 до П-9. Эти девять потоков расположены приблизительно равномерно по всему разрезу. Под потоками П-5, П-6 и П-9 обнаружены зоны обжига. Обожженные контакты П-5 и П-9 сложены туфогенными породами, в которых попадают обломки порфиритов, в то время как в контакте П-6 обжигу подвергся порфиритовый лавовый поток”.

В статье [Большаков, Солодовников, 1981] дается подробное описание магнитных свойств образцов и говорится о том, что авторы использовали метод Вилсона [Wilson, 1966] (сравнение температурных кривых $NRM(T)$ и $TRM(T)$ с точки зрения их подобия) – для отбраковки тех пород, где подобия кривых $NRM = f(T)$ и $TRM = f(T)$ не наблюдалось. Поскольку в нашем распоряжении было ограниченное количество каменного материала, в наших экспериментах мы сделали упор прежде всего на определение палеонапряженности по методике Телье с выполнением процедуры “check-points”. На остатках материала снимались также температурные кривые намагниченности насыщения $M_s(T)$ при последовательных нагревах образцов до возрастающих температур $T_i \in \{300, 400, 500, 600, 700\}^\circ\text{C}$. Для группы исследованных образцов были измерены магнитные параметры: намагниченность насыщения M_s , остаточная намагниченность насыщения M_{rs} , коэрцитивная сила H_c и остаточная коэрцитивная сила H_{cr} , после чего посчитаны характеристические отношения M_{rs}/M_s и H_{cr}/H_c .

А.С. Большаков и Г.М. Солодовников эксперименты по определению палеонапряженности выполняли по единой схеме. Для нагревов использовалась большая печь, ориентированная своей длинной осью по земному полю, в нее одновременно помещались 20–30 кубиков с ребром 24 мм. Нагревы происходили на воздухе, использовалась классическая схема Телье: при первом нагреве образцы располагались по полю, при втором нагреве – разворачивались на 180° против поля.

В нашей работе мы использовали трехкомпонентный термоманометр конструкции Вино-

градова, который позволяет вести непрерывные измерения полного вектора намагниченности образца (размером до 1 см) как при комнатной, так и при повышенных температурах, вплоть до 750°C. Чувствительность прибора $\approx 10^{-8}$ Ам², он полностью автоматизирован: процедура Телье выполняется непрерывно и занимает приблизительно сутки для одного образца. Использовалась методика Телье в версии Коэ: при каждом температурном шаге до T_i образцы грелись дважды, первый раз – без поля, второй раз – в лабораторном поле $H_{\text{лаб}} = 20$ мкТ. Такое значение $H_{\text{лаб}}$ было выбрано с целью приблизить его к величине древнего поля, в котором (как это предполагалось а priori по литературным данным о величине $H_{\text{др}}$ в мелу) приобреталась NRM. После каждого двух циклов нагревов до возрастающих температур T_i выполнялась процедура “check-points”, т.е. проводились возвратные нагревы до более низких температур T_{i-2} . В целом, каждый эксперимент Телье включал в себя (15–20) температурных шагов и (7–9) возвратных нагревов. Для увеличения статистики использовались несколько маленьких кубиков-дублей, результаты по ним мы рассматриваем как независимые.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Магнитные параметры были определены на группе образцов из потоков П-5 и П-9. Судя по значениям характеристических отношений $M_{\text{с}}/M_{\text{н}}$, $H_{\text{с}}/H_{\text{н}}$, которые меняются в пределах (0.1–0.2) и (2–4), соответственно, магнитными носителями остаточной намагниченности в изученных породах являются магнитные зерна псевдооднодоменного размера. Температуры Кюри $T_{\text{с}}$, определенные по температурным кривым $M_{\text{с}}(T)$, в основном лежат в пределах (560–575)°С, что указывает на титаномагнетит с низким содержанием титана и/или магнетит как основные ферромагнетики, но часть образцов из точки П-9 и особенно породы разреза П-6 обнаруживают $T_{\text{с}}$ в интервале (610–620)°С. Кривые $M_{\text{с}}(T)$ при нагревах до последовательно возрастающих температур обнаруживают вполне устойчивое поведение вплоть до 600°C.

По результатам измерений в процессе выполнения процедуры Телье для каждого образца строились две диаграммы: Араи-Нагата и Зейдервельда (в координатах образца). При анализе сравнивались обе диаграммы, при этом отбирались те образцы, для которых выполнялись следующие критерии: а) на диаграмме Араи-Нагата температурный интервал (T_1, T_2) , по которому проводится линейная аппроксимация для оценки $H_{\text{др}}$, должен включать не менее 4 репрезентативных точек; б) изменение NRM в пределах этого интервала должно составлять не менее 20% полной NRM; в) до интервала (T_1, T_2) и в его пределах разница в величинах $p\text{TRM-check}$ и первичной

$p\text{TRM}$, нормализованная на величину полной TRM, должна быть $\leq 5\%$, г) на диаграммах Зейдервельда в интервале (T_1, T_2) характеристическая компонента не меняет своего направления.

У NRM изученных образцов, как правило, проявляется вторичная компонента, которая легко разрушается нагревами до (300–350)°С. На рисунке показаны примеры диаграмм Араи-Нагата (слева) и Зейдервельда (в координатах образца, справа) для образцов изученных потоков. На графиках слева кружки представляют положение репрезентативных точек при первичных нагревах, полые квадраты – “check-points”, горизонтальные и вертикальные линии от этих точек показывают, от какой более высокой температуры делался проверочный нагрев. Пунктирная fit-линия отмечает интервал, по которому оценивалась величина $H_{\text{др}}$. По диаграммам Араи-Нагата видно, что при нагревах по крайней мере до 600°C в образцах не происходит заметных химических изменений – положение “check-points” очень близко к точкам первичных $p\text{TRM}$.

Полная сводка определений $H_{\text{др}}$, которые вошли в статистику для последующего расчета VDM, представлена в табл. 1. В ней (T_1, T_2) означает температурный интервал диаграммы Араи-Нагата, по которому проводилась аппроксимация для расчета $H_{\text{др}}$, N – число репрезентативных точек в этом интервале. Параметры g , q и f , рассчитанные согласно Коэ [Coe et al., 1978], характеризуют качество полученных результатов. Фактор g показывает, насколько равномерно распределены точки по выбранному интервалу температур – для идеального случая равноотстоящих друг от друга точек он равен $(N-2)/(N-1)$ и убывает с ростом неравномерности (скученности) распределения точек на диаграмме Араи-Нагата. Фактор f есть отношение доли “полезной” NRM, использованной для оценки $H_{\text{др}}$, к полной NRM. Коэффициент K есть тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой на диаграмме Араи-Нагата в интервале (T_1, T_2) и равен отношению $H_{\text{др}}/H_{\text{лаб}}$; параметр σK дает стандартную ошибку его определения. Фактор качества $q = kf/g/\sigma$ отражает интегральную оценку качества данного определения – заслуживающими доверия признаются те определения $H_{\text{др}}$, для которых $q \geq 5$. Поскольку этому критерию удовлетворяют почти все образцы из табл. 1, полученные данные обладают достаточно высокой степенью надежности.

По каждой точке отбора были посчитаны средние значения $H_{\text{др}}$ (табл. 2). Все полученные значения – низкие по своей величине и весьма близкие к результатам [Большаков, Солодовникова, 1981]. В статье [Большаков, Солодовников, 1981] авторы пишут: “При расчете $M_{\text{др}}/M_0$ пришлось исключить данные для потока П-1, так как есть подозрение, что время его формирования

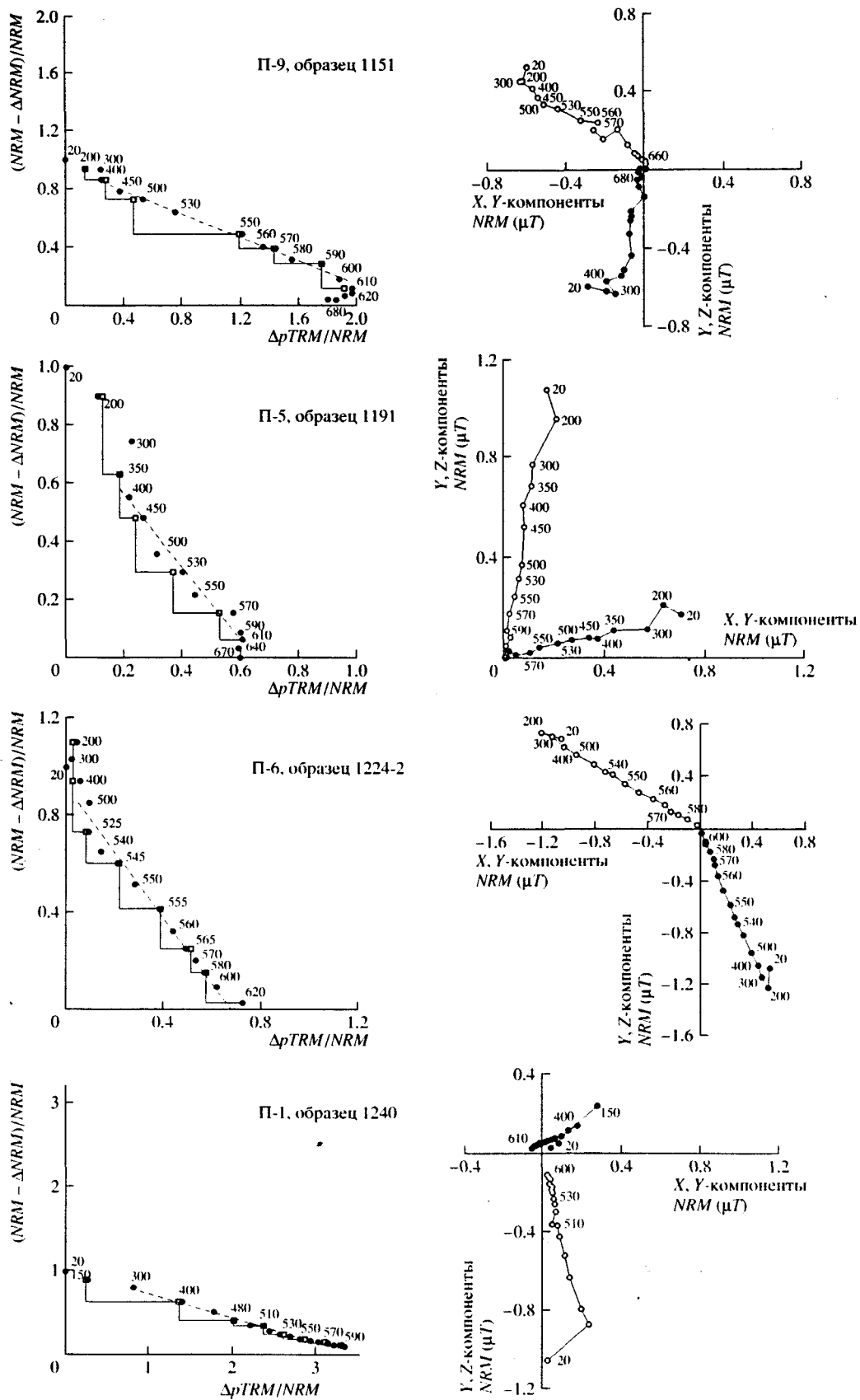


Рисунок.

Таблица 1

Образец	$(T_1, T_2), ^\circ\text{C}$	N	g	q	f	K	σK	$H_{\text{др}}, \text{мКТ}$	$\sigma H_{\text{др}}, \text{мКТ}$
П-9									
1151	450–610	10	0.86	14.3	0.66	0.40	0.02	7.99	0.13
1154	450–590	8	0.77	5.7	0.39	0.59	0.03	11.79	0.37
1156	200–620	14	0.91	14.0	0.85	0.51	0.03	10.16	0.29
1157	200–560	8	0.84	11.2	1.00	0.41	0.03	8.10	0.25
1158	200–530	6	0.78	3.1	0.33	0.88	0.07	17.52	1.26
1159	400–590	9	0.82	3.3	0.37	0.99	0.09	19.75	1.79
1161	200–610	13	0.91	13.1	0.94	0.55	0.04	11.08	0.40
1164	300–620	13	0.88	10.1	0.91	1.12	0.09	22.35	1.98
1164	450–620	11	0.88	9.0	0.58	0.90	0.05	17.96	0.92
1165	500–620	10	0.87	11.0	0.56	0.44	0.02	8.83	0.17
1168	350–620	12	0.90	13.3	0.75	0.84	0.04	16.83	0.71
1169	350–610	11	0.88	6.4	0.57	0.79	0.06	15.75	0.98
1170	350–590	9	0.86	11.7	0.48	1.00	0.04	19.99	0.70
1173	350–630	13	0.82	7.4	0.62	0.69	0.05	13.80	0.66
П-5									
1184	400–620	12	0.90	11.3	0.46	0.98	0.04	19.67	0.70
1185	400–610	7	0.76	5.7	0.46	1.01	0.06	20.21	1.25
1186	400–540	7	0.81	19.5	0.39	0.93	0.02	18.53	0.28
1188	350–610	9	0.86	7.0	0.56	0.95	0.07	18.96	1.24
1189	400–610	8	0.82	5.6	0.49	1.11	0.08	22.12	1.75
1190	400–610	8	0.84	3.8	0.36	0.83	0.07	16.56	1.11
1191	350–640	10	0.87	7.8	0.60	1.27	0.09	25.48	2.17
1193	350–640	10	0.87	5.8	0.56	1.31	0.11	26.25	2.89
1194	350–640	10	0.88	6.1	0.44	0.81	0.05	16.24	0.83
1197	350–670	11	0.86	6.0	0.48	1.12	0.08	22.48	1.76
1198	350–600	9	0.83	13.1	0.54	1.01	0.03	20.28	0.70
1201	250–630	12	0.87	17.0	0.79	1.07	0.04	21.38	0.93
1203	300–630	11	0.88	7.6	0.60	1.16	0.08	23.19	1.87
1204	450–630	8	0.83	10.7	0.58	1.24	0.06	24.88	1.39
П-6									
1218	500–600	7	0.77	12.4	1.03	1.15	0.07	22.91	1.68
1219	400–620	10	0.78	30.8	1.01	0.84	0.02	16.73	0.36
1220-1	540–630	7	0.74	10.6	0.33	0.74	0.02	14.85	0.26
1220-2	500–620	13	0.89	19.6	0.79	0.95	0.03	19.04	0.65
1221	400–620	14	0.91	22.4	0.90	0.80	0.03	16.04	0.47
1223	300–620	15	0.91	17.2	1.09	1.33	0.08	26.55	2.02
1224-1	525–620	12	0.89	20.4	0.65	1.14	0.03	22.85	0.74
1224-2	400–620	13	0.91	16.1	0.91	1.31	0.07	26.27	1.77
1225	500–620	13	0.89	9.0	0.72	1.20	0.08	23.92	2.03
П-1									
1240	300–500	5	0.72	8.9	0.45	0.33	0.01	6.56	0.08
1242	200–530	8	0.84	8.4	0.47	0.29	0.01	5.78	0.08
1243	300–530	6	0.76	5.8	0.44	0.24	0.01	4.73	0.06
1245	200–590	11	0.84	10.8	0.50	0.44	0.02	8.78	0.15
1246	200–590	11	0.85	7.1	0.55	0.22	0.01	4.40	0.06
1247	300–590	9	0.28	1.0	0.55	0.35	0.05	6.97	0.36
1266	300–610	10	0.84	13.0	0.74	0.19	0.01	3.72	0.03
1267	300–640	11	0.64	9.5	1.16	0.15	0.01	3.04	0.04
1269	450–610	7	0.74	5.9	0.58	0.23	0.02	4.55	0.07
1271	450–640	8	0.70	4.1	0.61	0.25	0.03	4.94	0.13

Таблица 2. Средние значения $H_{др}$, VDM и их стандартные отклонения по потоку, полученные в данной работе и приведенные в статье [Большаков, Солодовников, 1981]

Точки отбора	Данные этой работы			Данные А.С. Большакова и Г.М. Солодовникова [1981]		
	Число образцов	$H_{др}$, мкТ	VDM ($\times 10^{22}$ Ам ²)	$H_{др}$, мкТ	Палеонаклонение, градусы	Число образцов
П-1	10	8.8 ± 1.7		9 ± 1		6
П-5	14	26.2 ± 3	5.35 ± 0.6	27 ± 2	45	11
П-6	9	21 ± 4.4	4.29 ± 0.9	24.5 ± 0.8	45	13
П-9	14	14.4 ± 4.8	2.9 ± 1	18 ± 1	46	17

пришлось на момент инверсии". По нашим определениям, этот поток также дает явно заниженную величину $H_{др}$. Из этой же статьи для расчета виртуального дипольного момента (VDM) нами взяты значения палеонаклонения (приведены в табл. 2). Отношение $H_{др}/H_0$, усредненное по трем потокам (П-5, П-6, П-9), по нашим данным и результатам Большакова А.С., Солодовникова Г.М. [1981], составляет, соответственно, 0.41 и 0.46. (Здесь $H_0 = 50$ мкТ – величина современного геомагнитного поля.)

ДИСКУССИЯ

Результаты наших экспериментов: измерения магнитных параметров, поведение кривых $M_s(T)$, положение "check-points" на диаграммах Араи-Нагата и сам вид этих диаграмм – говорят о доброкачественном материале, с которым работали Большаков и Солодовников, и о надежности полученных ими результатов. Нам представляется важным, что мы подтвердили вывод, сделанный в работе [Большаков, Солодовников, 1981], что в мелу величина $H_{др}$ была существенно ниже современной – более чем в 2 раза. Полученные нами ранее результаты по меловым породам Грузии [Щербакова и др., 2007] и Армении (Shcherbakova et al., in press) также указывают на низкую величину $H_{др}$ в это время и поддерживают гипотезу о низком значении палеополя в мезозое.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-05-64538.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большаков А.С., Солодовников Г.М. О напряженности геомагнитного поля в позднемеловое время // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1981. № 10. С. 58–68.
- Щербаков В.П., Сычева Н.К. Об изменении величины геомагнитного диполя за геологическую историю Земли // Физика Земли. 2006. № 3.
- Щербакова В.В., Щербаков В.П. О критериях надежности результатов при определении напряженности древнего геомагнитного поля. Материалы международного семинара. Казань. 2004. С. 117–121.
- Щербакова В.В., Щербаков В.П., Сычева Н.К., Водовозов В.В. Палеонапряженность на границе пермь-триас и в поздней перми // Физика Земли. 2005. № 11. С. 79–92.
- Heunemann C., Krasa D., Gurevitch E.L., Soffel H.C., 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.
- Coe R.S., Gromme C.S., Mankinen E.A. Geomagnetic paleointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific nondipole low // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. P. 1740–1756.
- Perrin M., Shcherbakov V.P. Paleointensity of the Earth's Magnetic Field for the Past 400 Ma: Evidence for a Dipole Structure during the Mesozoic Low // J. Geomag. Geoelectr. 1997. V. 49. P. 601–614.
- Selkin P.A., Tauxe L. Long-term variations in palaeointensity // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 2000. V. 358. P. 1065–1088.
- Tarduno J.A., Cottrell R.D. Dipole strength and variation of the time-averaged reversing and nonreversing geodynamo based on Thellier analyses of single plagioclase crystals // J. Geophys. Res. V. 110. B11101, doi:10.1029/2005JB003970, 2005.
- Tauxe L., Staudigel H. Strength of the geomagnetic field in the Cretaceous Normal Superchron: New data from submarine basaltic glass of the Troodos Ophiolite // Geochemistry Geophysics Geosystems. 2004. № 5. P. 26–41.
- Wilson R.L. Palaeomagnetism and Rock Magnetism // Earth. Sci. Rev. 1966. № 1. P. 175.