

УДК. 550.383.32

НАПРЯЖЕННОСТЬ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ИСПАНИИ ВО ВТОРОМ ТЫСЯЧЕЛЕТИИ ДО НАШЕЙ ЭРЫ

© 2005 г. К. С. Бураков¹, И. Е. Начасова¹, Т. Нахейра², Ф. Молина², Х. А. Камара²

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

²Департамент истории и археологии университета Гранады, г. Гранада. Испания

Поступила в редакцию 29.06.2004 г.

Проведены археомагнитные исследования керамического материала из многослойного археологического памятника Испании "La Motilla del Azuer". Для датирования памятника использована методика определения возраста керамики по ее пористости. Исследование магнитных свойств керамики позволило проследить относительные изменения климата за время существования поселения. Получены детальные данные о напряженности геомагнитного поля, построена средне-20-летняя кривая вариаций напряженности поля, анализ которой показал, что в интервале 1830–1250 гг. до н.э. напряженность поля может быть представлена суммой синусоид с периодами 675, 120 и 66 лет.

ВВЕДЕНИЕ

Недостаточная точность датировки археологических объектов, возраст которых - несколько тысячелетий, сильно затрудняет изучение вариаций геомагнитного поля по археомагнитным данным, полученным по материалам этих объектов, так как точность привязки получаемых определений к шкале времени при этих исследованиях не менее важна, чем точность определения параметров древнего геомагнитного поля. Возможность повышения точности датирования исследуемого материала дают исследования, проводимые на материалах многослойных археологических памятников, в которых накопление материала длительное время происходило непрерывно. В результате изучения материала из таких памятников можно получить ряды данных о параметрах древнего геомагнитного поля, представляющие собой ряды определений в отрезки времени, следующие друг за другом, что позволяет построить картину изменения древнего геомагнитного поля за период функционирования археологического памятника с большей подробностью, чем по отдельным объектам.

Первые археомагнитные исследования с целью изучения вариаций геомагнитного поля в голоцене на территории Испании были проведены на керамике из многослойного поселения "Cendres Cave" [Начасова и др., 2002а; б]. Была построена кривая изменения напряженности геомагнитного поля с V по II тыс. до нашей эры. По материалам памятников территориально близко расположенного района были также получены данные о напряженности поля в VIII и XI веках нашей эры. Исследование совокупности имеющихся данных (включая данные прямых наблюдений за период с 1840 по 1990 год) позволили по-

лучить фазово-амплитудные характеристики 8000- и 1600-летней вариации напряженности геомагнитного поля в Испании. Рассмотрение характеристик этих вариаций для различных территорий Евразии в последние (8 тысячелетий) привело к выводу о неизменности направления и скорости дрейфа 1600-летнего колебания в течение этого времени, и подтвердило наличие восточного дрейфа 8000-летней вариации напряженности поля. Характеристики "основного" колебания напряженности геомагнитного поля были определены в предположении, что и на территории Испании, как и на территориях, относящихся к долготному сектору от 27 до 136°E, "основное" колебание имеет период, близкий к 8000 лет. На территории Испании имеется большое количество многослойных археологических памятников, исследование намагниченности материалов которых дает возможность не только получения данных о геомагнитном поле на протяжении всех восьми последних тысячелетий, но и в ряде случаев возможность получения уникальных по подробности данных о вариациях геомагнитного поля в голоцене. Получение достоверных подробных данных об изменении геомагнитного поля в прошлом необходимо для исследования процессов генерации магнитного поля Земли. Использование результатов археомагнитных исследований может быть также весьма полезно при решении ряда задач археологии.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование вариаций напряженности геомагнитного поля во II тысячелетии до н.э. проведено на керамическом материале, отобранном из многослойного археологического памятника бронзо-

вого века "Motilla del Azuer" ($\lambda = 39^\circ 02' 40''$ N, $\phi = 3^\circ 29' 39''$ W), далее для краткости будем обозначать его "Азуер", расположенного вблизи реки Азуер, притока р. Гвадиана в южной части центрального плато Испании, известного как Месета.

Систематическое обследование многочисленных памятников бронзового века, проведенное сотрудниками факультета истории и археологии Университета Гранады [Nájera, Molina, 1977] и факультета истории и археологии Объединенного Университета Мадрида [Fernandez-Miranda et al., 1994; Fernandez-Posse et al., 2000; 2001], выявило их большое разнообразие. Археологические памятники эпохи бронзы в Ла-манче подразделяются на три типа. Первый является поселением городского типа, второй и третий — это поселения, одни из которых — просто холмы (телли), возвышающиеся над окружающей поверхностью, другие — образованы поверх небольших холмов.

"Азуер" является единственным памятником первого типа, на территории которого были проведены обширные раскопки [Molina et al., 1979; Nájera et al., 1981; Molina, Najera, 1987], хотя с 70-х по 90-е годы проводились ограниченные раскопки ряда памятников. Радиоуглеродные даты, полученные по материалам этих памятников, показывают, что возраст памятников лежит в пределах от 4000 до 3260 лет. Археологические исследования памятника "Азуер" показали, что он охватывает весь этот временной интервал. Памятник "Азуер" имеет все отличительные черты, характерные для памятников первого типа. В середине памятника расположены фортификационные укрепления, включающие в себя центральную башню и несколько концентрических стен вокруг нее. Пространство между стенами использовалось для размещения складов, торговых рядов и как место для открытых очагов. За пределами укрепленной части повсюду находились поселения с длинными прямоугольными помещениями, в которых часто встречаются захоронения под полами, причем такие захоронения в фортификационной части встречаются только в последнюю фазу существования поселения, что указывает на то, что в этой части не было перекопов.

Изученный разрез (№ 1) расположен в пространстве между фортификационными стенами и имеет мощность 7.2 метра от вершины холма до коренных пород в основании. Образцы для археоманнитных исследований были отобраны из всех слоев разреза № 1 от верха до дна через каждые 20 сантиметров, всего отобрано для археоманнитных исследований 52 фрагмента из стенок керамических сосудов (табл. 1).

ДАТИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛА

На начальном этапе проведения археоманнитных исследований отобранного материала радиоуглеродных определений возраста в нашем распоряжении не было, и мы воспользовались методом датирования по пористости керамики [Начасова и др., 2002б], который был предложен авторами при исследовании материалов неолитического памятника Испании "Cendres Cave".

Для всех отобранных фрагментов керамики были проведены определения пористости. Пористость P (в процентах к объему) определялась как:

$$P = 100 \frac{P_3 - P_1}{P_3 - P_2},$$

где P_1 , P_2 и P_3 — вес образцов: сухого образца, вес образца в воде и мокрого (но без свободной воды на поверхности) соответственно.

Изменение пористости керамики P от глубины /7 слоя, в котором она отобрана, можно представить в виде: $P = C_h h + P_0$. Эта зависимость показана на рисунке 1а в виде прямой, для которой $C_h = 0.0047\%/см$, $P_0 = 20.734\%$. Видно, что с глубиной пористость увеличивается, хотя разброс точек относительно прямой довольно значителен. На рисунке 1б приведена гистограмма распределения отклонения точек от прямой линии, описывающей эту зависимость. Видно, что распределение не мономодальное, и можно выделить три группы керамики. В соответствии с полученными результатами по пористости было проведено дополнительное обследование керамического материала, из которого были взяты пробы.

Оказалось, что выделенные группы соответствуют функциональной предназначенности соответствующей керамики. В первую группу со средней пористостью ($-5 < dP < 2$) попадают керамические изделия ежедневного пользования, включая кухонную посуду. Вторую группу с высокой пористостью ($dP > 2$) составляет в основном керамика из хранилищ (сосуды для хранения зерна). Третья группа представлена высококачественной керамикой, включая парадную, с низкой пористостью ($dP < -5$). В результате разделения таким образом керамики на типичные группы была выделена более многочисленная и представительная, встречающаяся во всех слоях разреза группа с мономодальным распределением, для которой были получены уточненные значения коэффициентов $C_i = 0.0036\%/см$ и $P_0 = 19.3\%$ (рис. 1в).

Определить продолжительность существования поселения можно, если известна скорость изменения пористости керамики со временем C_i . К настоящему времени для территории Испании мы имеем лишь два определения этой скорости: одно — по неолитической керамике "Cendres Cave" [Начасова и др., 2002б] $C_i = 0.0026\%/год$, второе — по датированной керамике памятника иберий-

Таблица 1. Список образцов керамики, отобранных из разреза № 1 многослойного археологического памятника эпохи бронзы "La Motilla del Azuer" (Daimiel, Ciudad Real) и результаты археомагнитных определений

N образца	N керамики	Глубина слоя, метры	Археологический горизонт	Плотность ρ_m , г/см ³	Пористость P , %	Фактор Q_{π}	Напряженность поля $H_{др}$, А/м	Годы до н.э.
1	D-2-12	Пов.-0.50	IVb	2.419	20.0	26.84	43.0 ± 2.2	1263
2	D-2-18	пов.-0.50	IVb	2.322	13.4	16.47	44.4 ± 2.5	1288
3	D-100-6	0.52-0.63	IVb	2.169	19.2	17.55	49.6 ± 2.5	1308
4	D-122-6	0.63-0.80	IVa-b	2.440	27.2	12.77	34.6 ± 1.4	1322
5	D-122-9	0.63-0.80	IVa-b	2.425	21.2	21.3	41.7 ± 3.3	1322
6	D-301-4	0.82-0.95	IVa	2.429	19.8	12.0	45.6 ± 0.6	1339
7	D-301-6	0.82-0.95	IVa	2.382	20.7	31.6	-	1339
8	D-307-11	0.95-1.15	IIIb	2.445	29	16.7	48.1 ± 0.8	1355
9	D-307-17	0.95-1.15	IIIb	2.430	18.8	11.4	48.7 ± 3.7	1355
10	D-324-1	1.15-1.35	IIIa	2.394	19.6	13.9	51.5 ± 1.0	1375
11	D-324-6	1.15-1.35	IIIa	2.362	24.0	25.7	47.9 ± 0.7	1375
12	D-337-6	1.35-1.55	IIIa	2.359	19.0	12.2	44.2 ± 0.5	1395
13	D-337-8	1.35-1.55	IIIa	2.414	24.7	30.6	-	1395
14	D-349-1	1.55-1.75	IIb	2.324	18.5	10.4	51.4 ± 0.6	1415
15	D-349-2	1.55-1.75	IIb	2.500	23.3	7.6	42.0 ± 0.6	1415
						18.5	51.0 ± 1.1	
16	D-358-1	1.75-1.95	IIa	2.406	19.7	17.0	51.8 ± 3.5	1435
17	D-369-2	1.95-2.15	IIa	2.462	26.0	27.8	-	1455
18	D-378-5	2.15-2.35	Ic-IIa	2.261	14.8	24.2	-	1475
19	D-387-1	2.35-2.55	Ic	2.148	14.3	15.0	51.0 ± 0.9	1517
20	D-402-2	2.55-2.80	Ic	2.321	16.1	23.1	47.5 ± 5.0	1536
21	D-402-1	2.55-2.80	Ic	2.404	20.9	8.2	49.4 ± 1.1	1536
						6.8	48.9 ± 0.8	
22	D-414-1	2.80-3.00	Ic	2.404	20.1	11.3	49.7 ± 1.0	1555
						11.2	50.0 ± 0.2	
23	D-414-3	2.80-3.00	Ic	2.495	27.8	12.2	49.5 ± 0.3	1555
24	D-428-5	3.00-3.20	Ic	2.361	21.0	39.9	52.0 ± 1.2	1572
25	D-439-5	3.20-3.40	Ic	2.228	18.6	15.0	43.0 ± 1.0	1589
26	D-447-6	3.40-3.60	Ic	2.555	31.5	35.4	46.3 ± 0.2	1606
27	D-447-19	3.40-3.60	Ic	2.219	18.0	22.4	46.7 ± 1.7	1606
28	D-462-7	3.60-3.80	Ic	2.101	23.2	22.7	49.8 ± 0.2	1623
29	D-462-23	3.60-3.80	Ic	2.432	14.45	16.6	46.7 ± 0.4	1623
30	D-467-15	3.80-4.00	Ic	2.123	30.1	24.3	49.1 ± 3.0	1640
						25.7	50.8 ± 1.3	
31	D-467-33	3.80-4.00	Ic	2.503	27.4	10.2	43.3 ± 0.6	1640
32	D-471-8	4.00-4.20	Ic	2.383	18.9	16.0	41.8 ± 1.9	1657
							41.6 ± 0.3	
33	D-471-19	4.00-4.20	Ic	2.484	27.4	25.3	45.3 ± 0.8	1657
							45.1 ± 0.4	
34	D-474	4.02	Ic	2.424	21.4	32.6	42.5 ± 0.5	1650
35	D-478-2	4.20-4.40	Ic	2.546	27.8	25.1	45.8 ± 0.1	1674
36	D-478-6	4.20-4.40	Ic	2.557	21.3	46.9	42.8 ± 6.1	1674
37	D-482-4	4.40-4.60	Ib/Ic	2.523	16.4	8.4	-	1691
38	D-482-31	4.40-4.60	Ib/Ic	2.449	21.4	16.4	47.4 ± 1.2	1691
39	D-486-2	4.60-4.80	Ib/Ic	2.408	21.5	8.9	44.3 ± 4.6	1708
40	D-492-8	4.80-5.00	Ic	2.426	23.7	12.2	40.2 ± 0.5	1725
41	D-505-3	5.00-5.20	Ib	2.497	29.2	36.5	41.2 ± 0.1	1741
42	D-505-5	5.00-5.20	Ib	2.432	21.1	24.0	43.6 ± 4.1	1741
43	D-509-2	5.20-5.40	Ib	2.340	16.1	17.5	44.4 ± 1.4	1758
44	D-509-12	5.20-5.40	Ib	2.469	26.8	33.8	42.6 ± 0.5	1758
						45.9	42.1 ± 0.7	
45	D-514-1	5.40-5.60	Ib	2.203	17.4	11.7	42.8 ± 0.6	1775
							41.4 ± 2.0	
46	D-518-3	5.60-5.80	Ib	2.354	20.2	32.6	36.4 ± 2.5	1792
47	D-522-5	5.80-6.00	Ib	2.350	18.3	18.4	42.4 ± 0.2	1810
48	D-522-2	5.80-6.00	Ib	2.557	25.5	16.9	38.5 ± 1.8	1810
49	D-526-2	6.00-6.20	Ib	2.654	33.3	27.5	43.6 ± 0.2	1830
50	D-530-2	6.20-6.40	Ib	2.251	14.4	14.5	57.1 ± 0.6	1850
51	D-535-4	6.40-6.80	Ia	2.339	16.1	17.2	56.6 ± 1.7	1875
52	D-535-21	6.80-7.20	Ia	2.523	29.6	20.4	50.6 ± 0.4	1905

ской культуры "Los Villares" [Mata, 1991] $C_i = 0.0047\%/год$, $P_i = 6.8\%$. Время существования поселения "Азуер" находится между временем существования этих поселений, поэтому в предположении, что величина коэффициента может в принципе меняться со временем, примем для керамики "Азуер" среднее значение $C_i - 0.00365\%/год$. Тогда скорость накопления слоев в поселении "Азуер" можно определить как: $V = C_i/C_h \sim 1$ см/год. Следовательно, продолжительность существования поселения можно оценить примерно в 720 лет. Принимая начальную (при производстве) пористость керамики P_i такой же как и у керамики "Лос Вилларес", определим время существования поселения "Азуер" приблизительно между 2000 и 1300 гг. до нашей эры.

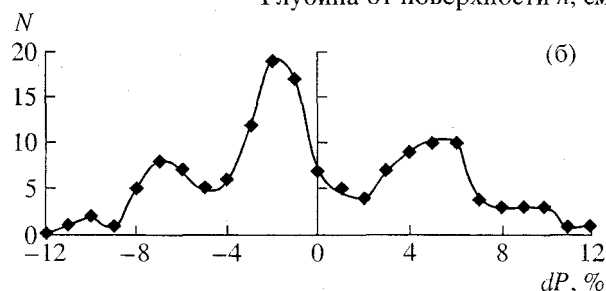
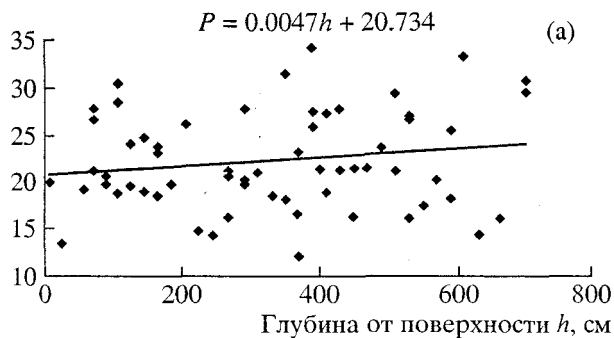
В дальнейшем по образцам, отобраным в нескольких траншеях при проведении раскопок памятника, были получены радиоуглеродные даты (табл. 2). Эти даты отнесены к раскопу № 1, из которого отобраны археоманитные образцы, хотя надо отметить, что при таком переносе возможны некоторые неточности.

Поскольку материал для датирования отобран не точно в месте отбора керамики, а сами даты имеют довольно широкий разброс, было проведено осреднение датировок, полученных для соответствующих археологических фаз (культурных горизонтов), средние значения были отнесены к середине мощности этих фаз. Эти даты и глубины отбора материала находятся в линейной зависимости, из этой зависимости выпадают лишь радиоуглеродные даты для археологической фазы Ib. Исключив это определение из рассмотрения, по всем остальным точкам методом наименьших квадратов определим $K - 1.018 \pm \pm 0.045$ лет/сантиметр. Возраст финального слоя (поверхностного) $t_0 = 3152$ года (1205 г. до н.э.), а начального - 3885 лет (1938 г. до н.э.). Таким образом, полученные разными методами оценки возраста отложений памятника практически совпадают.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА

Из фрагментов керамики при помощи камнерезного станка были выпилены образцы прямоугольной формы. Большинство фрагментов имели размеры, достаточные для того, чтобы изготовить из них по одному образцу; при этом одна из граней образца была ориентирована параллельно поверхности стенки керамического фрагмента. Размер граней образца - от 2 мм до 10 мм, насколько позволяли размеры фрагмента, объем образцов при этом составлял от 0.3 до 1 см³. Часть фрагментов имела достаточно большие размеры, и из них были выпилены по два образца, которые были использованы для определения древнего

Пористость керамики P , %



Пористость P , %

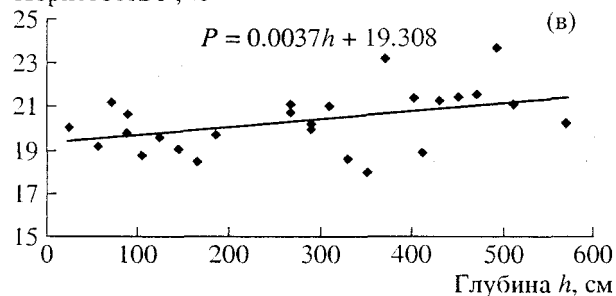


Рис. 1. Изменение с глубиной пористости керамики в разрезе шурфа № 1 памятника "Азуер": (а) результаты определения пористости для всей коллекции керамики, прямая линия на графике - аппроксимация зависимости $P(h)$ методом наименьших квадратов; (б) гистограмма распределения величин отклонения точек от аппроксимирующей прямой; (в) зависимость пористости от глубины для образцов керамики со средней пористостью $-5 < dP < 2$.

поля по методике Телье (дубли образцов 15, 21, 22, 29, 30, 44).

Приготовленные образцы в течение месяца выдерживались в пермалловых экранах для чистки вязкой намагниченности. После этого были измерены остаточная намагниченность J_n , магнитная восприимчивость χ_0 и анизотропия магнитной восприимчивости по методике, описанной в [Бураков, 1999].

Определение напряженности древнего геомагнитного поля было проведено по методике Телье, с использованием модификации, в которой первый нагрев образцов до каждой температуры осуществляется в отсутствие магнитного поля. Нагревательная печь помещена в систему из трех пар колец Гельмгольца, током которых лабора-

Таблица 2. Результаты радиокарбонowego датирования культурных горизонтов археологического памятника "Азуер"

Фаза	Образец №	Глубина, см	Лабораторный №	Дата C ¹⁴
IV?	D-37	110	UGRA-19	3260 ± 140
IIIb	D-327	80	Ly-2655	3540 ± 130
IIIb	D-328	100–110	UGRA-20	3480 ± 140
IIIb	D-373	130?	UGRA-109	3400 ± 130
Ic	D-443	300–320	UGRA-21	3500 ± 140
Ic	D-475	410	UGRA-97	3490 ± 180
Ic	D-432	300–320	GrN-10141	3645 ± 35
Ib	D-490	475–482	GrN-10142	3690 ± 35

торное магнитное поле компенсируется и поддерживается на нулевом уровне с помощью следящей системы. Второй нагрев при той же температуре осуществляется при отключенной системе компенсации лабораторного поля. Температуры нагревов - 130, 175, 200, 220°C, и далее через 40–45°C до 590°C. Величина поля в месте расположения образцов определяется перед нагревом протонным магнитометром ММП-1. После первого нагрева определяются компоненты естественной остаточной намагниченности J_{ni} . После второго нагрева в лабораторном магнитном поле намагниченность образца равна векторной сумме J_{ni} и приобретенной парциальной термонамагниченности J_{pi} , поэтому, вычитая векторно намагниченность образца после первого нагрева из намагниченности после второго нагрева, получаем величину парциальной термонамагниченности J_{pi} .

Состав ферромагнитной фракции керамики довольно однороден и представлен в основном одно- и многодоменным магнетитом. Об этом можно судить по кривым размагничивания J_n температурой (рис. 2а), J_{pi} - переменным магнитным полем (рис. 2в) и по гистограмме распределения температур, после нагрева до которой величина J_{pi} достигает половины полной величины термонамагниченности (после нагрева до 590°C); как видно из гистограммы, пик распределения приходится на температуру около 470°C, а распределение - одномодальное (рис. 2б).

Стабильность термонамагниченности можно оценить по величине Q_{pi} , равной отношению полной термонамагниченности к индуктивной в одном и том же магнитном поле. Из гистограммы (рис. 2г) видно, что для керамики "Азуер" характерной является величина Q_{pi} порядка 15, и одномодальное распределение.

Анизотропия магнитной восприимчивости керамики оценивалась по величине отношения максимальной восприимчивости к минимальной (рис. 3а). Для всей коллекции в целом характерна плоско-

стная анизотропия (рис. 3б), т.е. магнитная восприимчивость максимальна в плоскости стенки керамики и минимальна по нормали к ней. В действительности ось минимальной восприимчивости направлена под некоторым углом к нормали к стенке сосуда, и его величина зависит от способа изготовления (лепки) сосуда при производстве. Как видно на рис. 3в, имеется два максимума на гистограмме распределения величины угла между нормалью к поверхности сосуда и направлением оси минимальной восприимчивости (около 5° и 11°). Отсюда можно сделать вывод о том, что было, по крайней мере, два таких способа в ручном (не гончарном) производстве, причем анализ показал, что первому пику соответствует керамика, предназначенная в основном для производства сыра.

Вычисление напряженности древнего геомагнитного поля было проведено по методике, учитывающей влияние анизотропии магнитной восприимчивости образцов и химические изменения магнитной фракции при нагревах [Бураков, 2000].

Коррекция J_n и J_{pi} на магнитную анизотропию производится в системе главных осей тензора магнитной восприимчивости. Для этого компоненты намагниченности J_n и J_{pi} по осям x , y , z образца, полученные на каждом температурном шаге, преобразуются в систему осей магнитной анизотропии, в этой системе корректируются [Бураков, 2000], после чего преобразуются обратно в систему осей x , y , z образца. Ранее методика была опробована на серии сантиметровых образцов керамики из археологического объекта "Лос-Вилларес" (Испания) [Бураков, 2000].

Для коррекции компонент термонамагниченности и естественной остаточной намагниченности необходимо предварительно определить соответствующие коэффициенты α и β . Методика определения корректирующих коэффициентов α и β (3 основана на том, что введение коррекции увеличивает сходимость направлений векторов термонамагниченности. Действительно, если серия образцов при нагреве ориентирована одинаково относительно направления магнитного поля, то направление термонамагниченности этих образцов должно быть одинаковым (с точностью их установки в печи и точности измерений). Однако мы наблюдаем разброс направлений векторов термонамагниченности, заметно больший ожидаемого, и связанный с тем, что направление намагниченности образца отклоняется от направления поля в сторону оси его максимальной магнитной восприимчивости, а поскольку оси магнитной анизотропии образцов направлены хаотично относительно направления магнитного поля, то и разброс векторов термонамагниченности также хаотичен. Таким образом, если для каждой температуры нагрева вычислять кучность направлений термонамагниченности серии образцов в за-

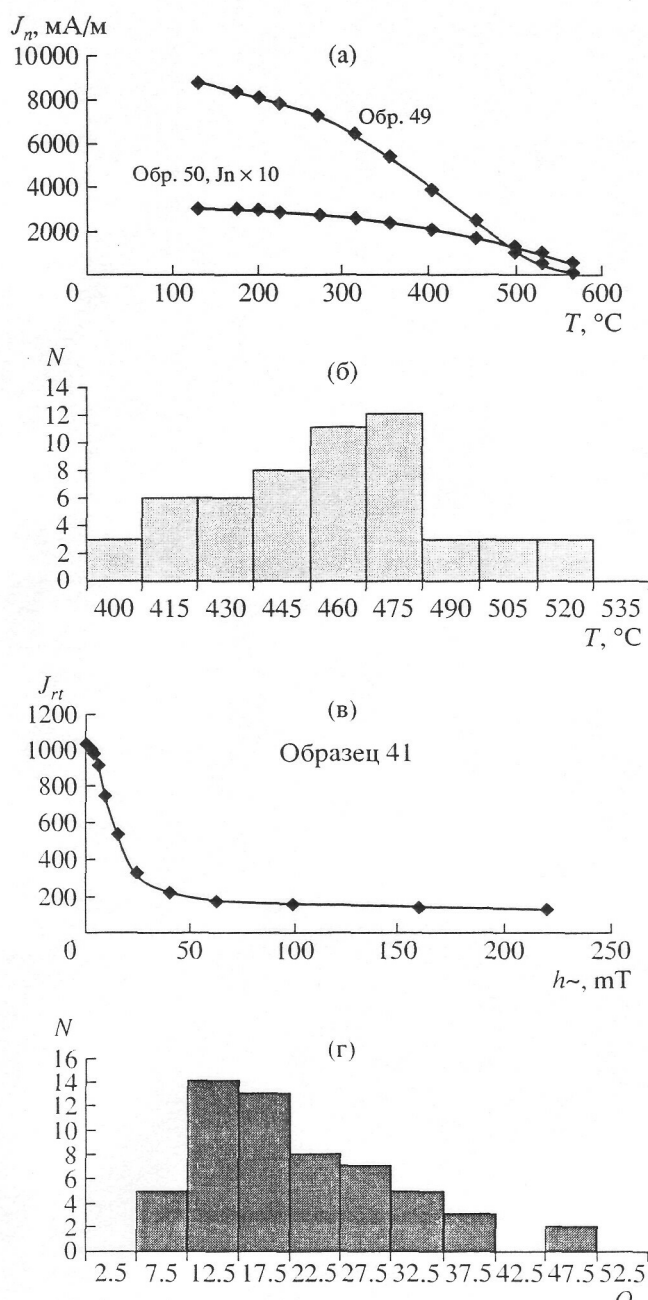


Рис. 2. Основные характеристики магнитных свойств керамики: (а) кривые терморазмагничивания естественной остаточной намагниченности J_n сильномагнитного образца 49 и слабомагнитного 50, полученные в результате температурной чистки при работе методом Телье; (б) гистограмма распределения образцов по медианной температуре термонамагниченности, т.е. температуре, после нагрева до которой термонамагниченность образца при охлаждении в лабораторном магнитном поле достигает половины полной термонамагниченности J_{rt} (от 590°C); (в) кривая размагничивания переменным магнитным полем термонамагниченности J_{rt} образца 41, созданной при его охлаждении от 590°C в постоянном магнитном поле 36.8 А/м, (г) гистограмма распределения образцов по величине Q_{rt} , равной отношению полной термонамагниченности в поле 36.8 А/м к индуктивной в том же поле.

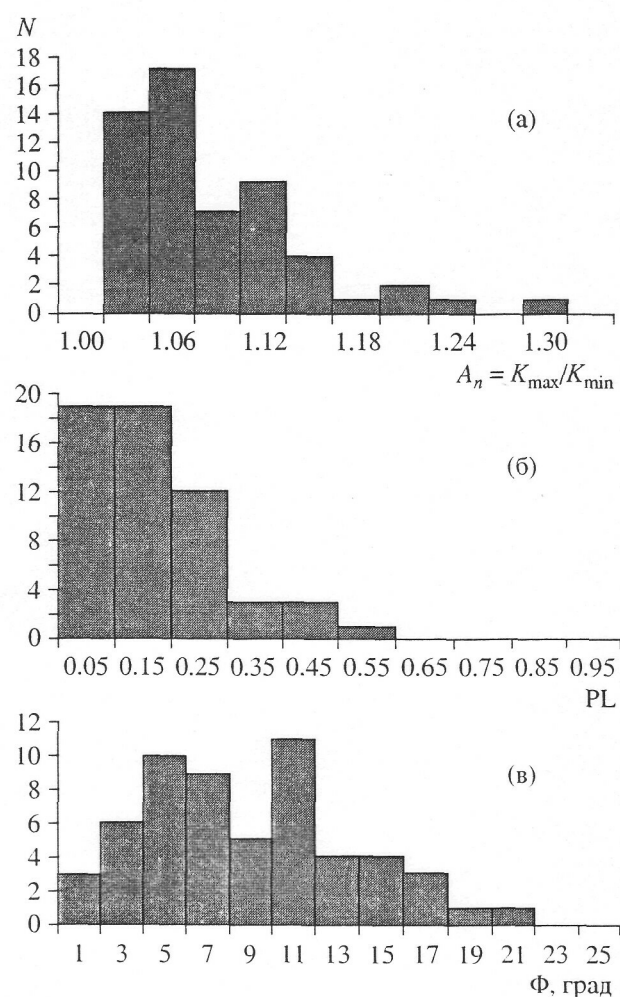


Рис. 3. Анизотропия магнитной восприимчивости керамики. Распределение образцов по: (а) величине отношения $A_n = K_{max}/K_{min}$; (б) величине $PL = (K_{max} - K_{min})/(K_{max} + K_{min})$, при плоскостной анизотропии $PL = 0$, при линейной $PL = 1$; (в) величине угла между направлением оси минимальной восприимчивости K_{min} и нормалью к поверхности (стенки) керамики.

в зависимости от величины коэффициента a , то можно определить такую его величину, при которой кучность направлений максимальна, как это показано на рис. 4а. Для определения оптимальных значений коэффициента (3 аналогичная зависимость находится для совокупности векторов, равных разности полной термонамагниченности образцов и термонамагниченности, полученной при низких температурах (рис. 4б). Как видно из рис. 4а, 4б, для серии из 16 образцов кучность векторов термонамагниченности увеличивается от 200 при отсутствии коррекции до значений порядка 1000 при $a = 2.8$. Отчетливо выявляется рост коэффициента от $a = 2$ для температур меньше 200°C до $a = 3$ для температур больше 500°C. Коэффициент (3) изменяется с температурой в мень-

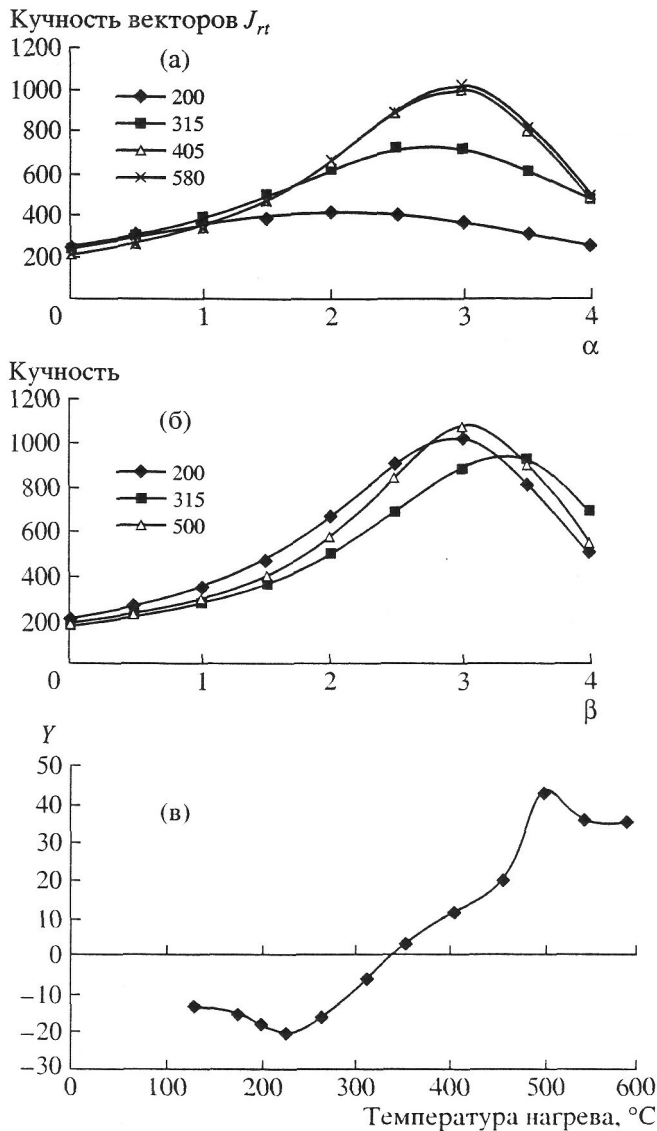


Рис. 4. Температурные зависимости корректирующих коэффициентов при введении поправок на анизотропию магнитной восприимчивости образцов и химические изменения магнитной фракции при нагревах: (а) зависимость кучности направления векторов парциальных термонамагниченности серии из 20 образцов от величины корректирующего коэффициента a при различных температурах создания J_{rt} ; (б) аналогичная зависимость для кучности направления части полной термонамагниченности, созданной от 590°C и оставшейся после температурной чистки при 200, 315 и 500°C от величины корректирующего коэффициента 3; (в) температурная зависимость коэффициента γ .

шей степени, и можно принять $P = 3$ для всех температур.

Химические изменения, проходящие в ферромагнитной фракции образца в результате нагрева, контролировали по изменению магнитной восприимчивости после каждой пары нагревов при заданной температуре. Коррекцию на химические

изменения проводили по методике, описанной в [Бураков, Начасова, 1985], используя температурную зависимость коэффициента γ для территории Испании, показанную на рис. 4в. Характер температурной зависимости коэффициента γ у всех образцов оказывается обычно одинаковым, но абсолютные величины несколько различаются у разных образцов. Для того, чтобы подобрать точные значения коэффициента γ для каждого образца, при вычислении напряженности древнего поля в формуле (4) [Бураков, Начасова, 1985] вместо величины лабораторного поля $J_{л}$ подставляется переменная величина J_{γ} , которая растет от 0 до такого значения, при котором ошибка определения напряженности поля становится минимальной, т.е. достигается наилучшая коррекция. Обычно величина J_{γ} оказывается либо близкой к напряженности лабораторного поля, если изменение магнитной восприимчивости образца от температуры к температуре заметно выше точности измерений, либо $J_{\gamma} = 0$, когда магнитная восприимчивость изменяется незначительно. Последнее обычно относится к низким температурам, менее 300°C.

Почти для всей керамики характерно вращение вектора остаточной намагниченности в процессе ее температурной чистки, что свидетельствует о неоднократном нагреве до высоких температур. Температуры нагревов различны, и не имеют четкого распределения, как это мы видели на керамике из "Cendres Cave" [Начасова и др., 2002]. Температурный интервал, в котором проводятся определения напряженности древнего геомагнитного поля, характеризуется постоянным направлением парциальных термонамагниченностей $J_{л}$. С другой стороны, в большинстве случаев использовался только низкотемпературный интервал, в котором химические изменения (изменения магнитной восприимчивости) были минимальны. К тому же - низкотемпературный обжиг является последним, перед тем как керамическая посуда была разбита и попала в накапливающиеся слои культурных отложений, следовательно, магнитное поле, определяемое по низкотемпературному интервалу, близко соответствует времени накопления слоя, из которого она отобрана.

Однако не у всех образцов можно выделить достаточно широкий температурный диапазон с постоянным направлением парциальных намагниченностей. Например, вектор остаточной намагниченности у образцов 17 и 18 в процессе термочистки непрерывно вращается. Это указывает на то, что раскаленная керамика была выброшена или выкатилась из огня, остывала, вращаясь (катилась по земле) и остановилась, когда ее температура была уже меньше 200°C. Определения напряженности поля, полученные для этих образцов по низкотемпературному интервалу, дали за-

ниженные значения, и были забракованы. Забракованы были также определения по образцам 7, 13, 37. Часть определений, хотя и не была забракована целиком, но из-за больших ошибок учитывалась при построении кривой вариаций напряженности геомагнитного поля с весом от 0.1 до 0.7; надежные определения имели вес, равный 1.

Одним из факторов, влияющих на точность определения напряженности древнего геомагнитного поля, является различие скоростей охлаждения керамики при образовании ее J_n в древности и при создании лабораторной J_{rt} . В нашей лаборатории образцы охлаждаются вместе с печью (внутри нее), при этом скорость охлаждения в интервале 600–200°C составляет около 10°C в минуту. Древняя термонамагниченность керамики могла быть создана как во время ее производства, при этом время охлаждения могло составлять несколько часов, как это показано, например, в [Gallett et al., 2002], так и во время вторичного обжига - при этом время охлаждения могло составлять десятки минут или несколько минут, если раскаленный черепок был выброшен из очага и охлаждался на воздухе.

Пределы возможных ошибок, связанных с различной скоростью охлаждения, мы оценили, проделав следующий опыт. Образцы нагрели до 600°C, охладили в печи до комнатной температуры в лабораторном магнитном поле $H = 36.8$ А/м (как обычно при проведении лабораторных исследований) и измерили их термонамагниченность J_{rto} . Затем проделали такой же опыт при охлаждении печи со скоростью 1°C в минуту, получили термонамагниченность J_{rts} . В третьем опыте после нагрева печи до 600°C образцы были удалены из печи и охлаждены на воздухе со скоростью порядка 100°C в минуту, в этом случае была получена термонамагниченность образцов J_{rtt} .

На рис. 5 представлены гистограммы распределения отношений J_{rtt} и J_{rts} к J_{rto} . Оказалось, что термонамагниченность, полученная при быстром охлаждении образцов, меньше, а при медленном – больше, чем при обычной скорости охлаждения. Магнитная восприимчивость образцов также зависит от скорости охлаждения и изменяется в пределах от -5% до +5%, при этом изменения не коррелируют с изменением J_{rt} . По-видимому, скорость охлаждения образца влияет не только на величину J_{rt} , но и на динамику химических изменений в ферромагнитной фракции. Для оценки влияния скорости охлаждения образца на величину напряженности древнего поля, определяемого по его термонамагниченности, была проведена обычная процедура определения древнего поля по методике Телье с коррекцией на образцах, термонамагниченность которых была создана при медленном (образцы № 8, 37, 38) и быстром охлаждении (образцы № 16, 28, 42). В табл. 3 при-

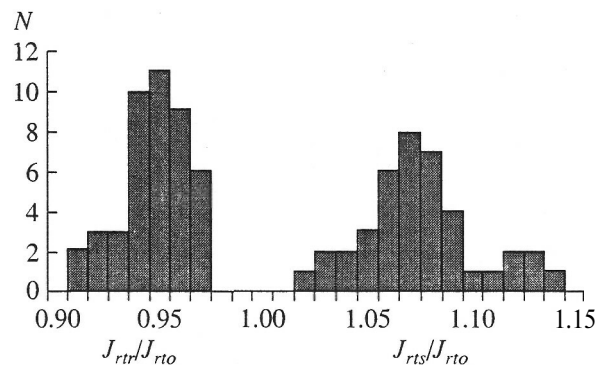


Рис. 5. Гистограммы распределения отношений термонамагниченностей, созданных при быстром охлаждении образцов J_{rtt} и при медленном J_{rts} к величине термонамагниченности J_{rto} , создаваемой при обычной скорости охлаждения.

ведены: относительная величина изменения намагниченности образца J_{rt}/J_{rto} (2 столбец); напряженность поля, вычисленная без коррекции на химические изменения (4 столбец); напряженность поля, вычисленная с коррекцией на химические изменения (5 столбец); разность скорректированных значений напряженности поля и истинного значения (6 столбец).

Эксперимент показал, что введение поправки на химические изменения уменьшают отклонение получаемых определений напряженности поля от истинного значения намагничивающего поля, т.е. величина J_{rt} зависит как от скорости охлаждения, так и от динамики химических изменений, происходящих в образце во время охлаждения. Наиболее ярко это видно из результатов определения напряженности поля по образцам с намагниченностью J_{rtt} . Изменения магнитной восприимчивости у образцов с намагниченностью J_{rts} оказались незначительными, что приводит к некоторому увеличению вычисленной ошибки определений напряженности при введении коррекции, однако при коррекции и в этом случае происходит при-

Таблица 3. Результаты определения напряженности магнитного поля по термонамагниченности, созданной при медленном (8, 37, 38) и быстром охлаждении (16, 28, 42) образцов

№ обр.	$\Delta J_{rt}, \%$	Интервал температур	$H, \text{А/м}$	$H \text{ кор.}, \text{А/м}$	$\Delta H \text{ кор.}, \%$
8	7.8	225–545	39.1 ± 0.3	38.1 ± 0.4	3.7
37	7.9	225–545	38.5 ± 0.3	36.2 ± 1.2	-1.5
38	12.8	225–545	39.3 ± 0.2	40.1 ± 0.3	9.1
16	-7.4	315–500	35.6 ± 0.6	36.1 ± 0.5	-1.7
28	-4.6	265–500	36.4 ± 0.3	36.5 ± 0.3	-0.8
42	-5.9	265–450	35.4 ± 0.9	36.5 ± 0.5	-0.8

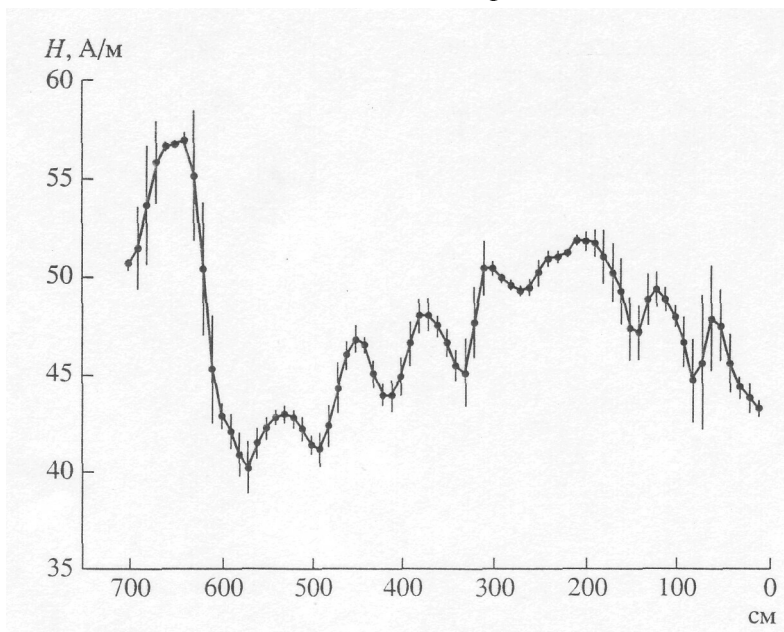


Рис. 6. Результаты определения напряженности геомагнитного поля по разрезу памятника "Азуер", сглаженные скользящим окном осреднения с эффективной шириной в 20 см и шагом в 10 см.

ближение к истинному значению напряженности поля (ΔH по сравнению с $\Delta J_{\text{г}}$ существенно меньше).

Для керамики поселения "Азуер" типично наличие вторичного обжига, поскольку это бытовая керамика. При таком обжиге (в очаге) скорость охлаждения близка к скорости охлаждения при проведении лабораторного эксперимента при работе по методике Телье, поэтому ошибки, связанные с различием скорости охлаждения при приобретении древней и лабораторной намагниченностей, минимальны. В большинстве случаев такие отклонения лежат в пределах обычной точности определений напряженности поля.

В любом случае введение коррекции на химические изменения существенно уменьшает влияние фактора различия скорости охлаждения при приобретении исследуемым материалом естественной термонамагниченности и термонамагниченности при проведении лабораторного эксперимента при работе по методике Телье.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Картина вариаций напряженности геомагнитного поля была построена по 47 определениям (табл. 1). Общая картина изменения напряженности поля в исследуемом временном интервале следующая (рис. 6): изменение напряженности поля во временной интервал накопления нижней части разреза (глубина 700–600 см) имеет вид пика, вариации напряженности геомагнитного поля на интервале накопления отложений на глубине 600–10 см имеют форму, близкую к довольно правильным гармоническим колебаниям на фоне поч-

ти монотонного роста (на временном интервале накопления материала на глубинах 600–280 см), и спада поля (на временном интервале накопления материала на глубинах 200–10 см), т.е. на фоне плавного изменения напряженности поля, которое можно представить как волну, имеющую период в несколько сотен лет. Вблизи максимума этой волны (соответствует слоям культурных отложений на глубинах 280–200 см) наблюдается нерегулярность в "короткопериодных" колебаниях.

"Короткопериодные" вариации напряженности геомагнитного поля в каждом из этих интервалов можно аппроксимировать синусоидами, периоды которых, выраженные в единицах мощности культурных отложений – 78 см для нижней части и 66 см – для верхней. Можно предположить, что какие-то существенные события повлияли на жизнь города, и они отразились в накоплении культурных осадков. Действительно, рассмотрение описания раскопок привело к обнаружению интересной стратиграфической последовательности: на глубине порядка 240 см находится слой, представляющий собой гребенку обожженной и размытой породы, на котором лежит слой песка и слой камней, предположительно вымытых из разрушенных стен. Вероятно, в момент, соответствующий накоплению слоя на глубине 240 см, произошел сильный пожар, в результате которого поверхность земли была обожжена, а затем через некоторое время на город обрушились ливни, размывшие накопившиеся слои осадочных пород вплоть до обожженного слоя, который защитил от размыва нижележащие слои. Таким образом, последовательно накапливающиеся после пожа-

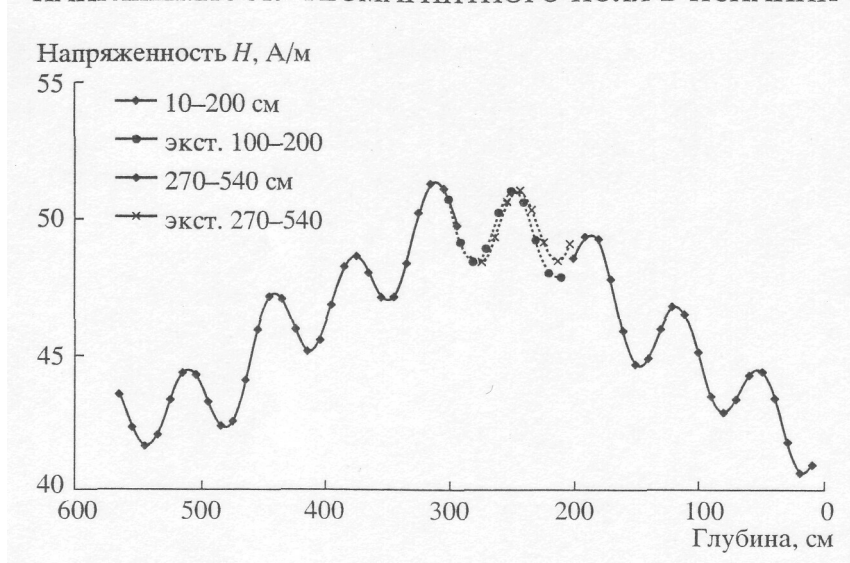


Рис. 7. Кривые вариаций напряженности геомагнитного поля (сплошные линии), аппроксимирующие ряды данных по разрезу на интервалах глубин 10–200 сантиметров и 270–540 сантиметров и их экстраполяция (пунктирные линии). Экстраполирующие кривые совмещены путем сдвига нижней части разреза вниз на 23 сантиметра.

ра слои были замещены мгновенно отложенными песками и галькой, вымытыми из разрушенных стен, и лежащими теперь на глубине 200–240 см. Это свидетельствует в пользу предположения об изменении скорости накопления культурных отложений памятника в течение существования поселения. Оценку мощности смытых слоев можно сделать с помощью экстраполяции вариаций вглубь по данным, полученным по отложениям в интервале 10–200 см, и вверх — по данным, полученным по отложениям в интервале 280–600 см. Вариация с периодом 66 см, полученная по верхней части разреза, должна иметь максимум на глубине 243 см, а вариация с периодом 78 см, выделенная по нижней части разреза, должна иметь максимум на глубине 220 см, что дает оценку мощности размытых слоев в 23 сантиметра.

Исследование спектра вариаций напряженности геомагнитного поля в диапазоне периодов в десятки лет на разных временных интервалах голоцена позволило сделать вывод, что спектр является дискретным и содержит три колебания с периодами примерно 35, 65 и 120 лет. Для преобразования линейного масштаба осадконакопления (сантиметры) во временной (годы), примем полученную оценку периода вариаций в 66 лет (принимая скорость осадконакопления для верхней части разреза равной 1 см/год), а для осадков ниже 240 см примем скорость накопления равной отношению периодов короткопериодных вариаций, выделенных в нижней и верхней частях разреза — 78/66 см/год. В результате анализа нового ряда методом градиентного спуска мы выделили два колебания с периодами 620 и 66,3 см.

Экстраполирующую кривую, полученную для верхней части разреза продолжим вниз, а соот-

ветствующую кривую для нижней части разреза — вверх. Для того чтобы эти кривые совпали, нужно сдвинуть нижнюю часть разреза на 23 сантиметра вниз, как это показано на рис. 7.

После этого кривую вариаций напряженности поля вновь построим уже во временном масштабе; полученные в результате трансформирования разреза и нормировки по радиоуглеродным определениям датировки образцов приведены в правом столбце табл. 1. Сглаженная кривая, полученная скользящим 20-летним осреднением, показана на рис. 8. Изменение напряженности поля имеет следующий вид: в конце XX — первой половине XIX веков до н.э. напряженность поля повышается до значения около 57 А/м для середины XIX века до н.э., затем следует резкое падение более чем на 15 А/м. По данным, полученным авторами по материалам многослойного неолитического памятника Испании "Cendres Cave" [Начасова и др., 2002б], напряженность поля во временном интервале XX — первая половина XIX века до н.э. достигает максимальных значений, а затем падает (от значений в среднем 60 А/м до примерно 40 А/м), т.е. ход изменения напряженности поля очень похож. По данным, полученным по материалу "Cendres Cave", обсуждаемый максимум — это максимум 1600-летней вариации напряженности. Это колебание имеет западный дрейф. "Cendres Cave" расположен на 7.1° восточнее "Азуер", и при скорости западного дрейфа 0.23 градуса в год сдвиг составит 30 лет, т.е. в районе "Cendres Cave" максимум этой вариации будет наблюдаться раньше. Это соответствует наблюдаемой картине. Таким образом, можно принять, что самые нижние слои культурных отложений памятника "Азуер" относятся в

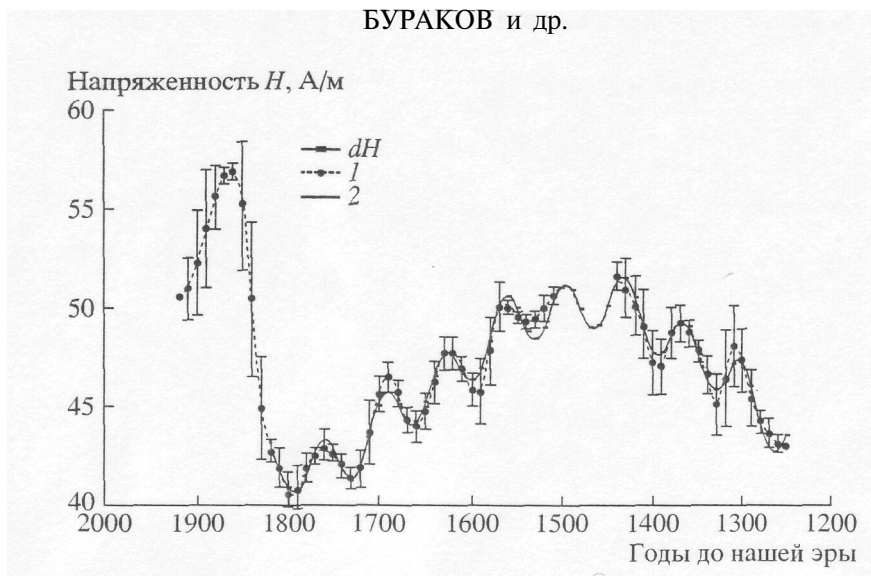


Рис. 8. Изменение напряженности геомагнитного поля в Испании (средне-20-летние данные). Вертикальные линии — среднеквадратические ошибки среднего значения поля в интервале осреднения. Сплошная кривая — аппроксимация полученного ряда данных суммой трех синусоид (в интервале 1840–1250 гг. до н.э.).

первом приближении к концу XX — началу XIX вв. до н.э.

Полученный ряд данных имеет подробность, предоставляющую возможность исследовать вариации напряженности геомагнитного поля с характерными временами в несколько десятилетий. Ряды данных такой подробности — большая редкость. Получены всего четыре ряда, позволяющие исследовать «короткопериодные» вариации. Это данные, полученные для района Москвы, Средней Азии и Месопотамии [Начасова, 1972; Начасова, Бураков, 1995; 1997; 1998].

Анализ построенной кривой, проведенный методом градиентного спуска, показал, что наиболее четко выделяются вариации с периодами 675 и 66 лет с амплитудами 4.3 ± 0.2 и 1.3 ± 0.1 А/м соответственно, выделяется также вариация с периодом 120 лет, амплитуда которой в четыре раза меньше, чем амплитуда «шестидесятилетней» вариации (табл. 4).

По результатам исследований изменения напряженности геомагнитного поля в разных регионах неоднократно отмечалось существование

вариации с периодом 600–700 лет. В исследуемом временном интервале она также отчетливо выявляется.

Полученные в данной работе характеристики «шестидесяти»- и «сто»-летних вариаций напряженности поля показали, что соотношение амплитуд этих вариаций меняется во времени. Феномен изменения амплитуд вариаций во времени был обнаружен авторами при исследовании вариаций с периодами в сотни и тысячи лет. Исследование этого феномена для «короткопериодных» вариаций весьма затруднен в связи с крайне малым количеством кривых изменения напряженности геомагнитного поля нужной подробности. Ранее имелся единственный факт что амплитуда «шестидесятилетней» вариации больше, чем амплитуда «стоletней» вариации (для VI тысячелетия), на основании которого можно было предполагать наличие этого изменения.

Таким образом, проведенное исследование позволило получить картину изменения напряженности геомагнитного поля во II тыс. до н.э. в Испании, удлинить ряд данных о напряженности геомагнитного поля в Испании, установить существование вариаций с периодами в 66 и 120 лет во II тыс. до н.э., что свидетельствует об устойчивости этих вариаций во времени, и получить их характеристики.

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

На основании различных анализов археологических находок в памятниках бронзового периода утверждается, что в течение этого периода времени климат был сухой и теплый (Rodríguez et al., 1999), хотя разнообразие диких животных было большое: млекопитающие (олени, зайцы, кабаны, рыси и т.д.), рыбы и 13 видов птиц (журавли.

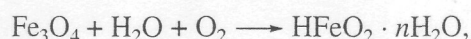
Таблица 4. Параметры синусоид, суммой которых аппроксимировано изменение напряженности геомагнитного поля в интервале 1830–1250 гг. до н.э. в Испании, в районе памятника «Азуер»

Период, лет	Амплитуда, А/м	Фаза в 1830 г. до н.э.	Средняя величина поля, А/м	Остаточная дисперсия, А/м
675	4.3 ± 0.2	-98.4 ± 1.8	46.429	0.438
120	0.3 ± 0.1	-5.5 ± 24.8		
66	1.3 ± 0.1	68.4 ± 6.1		

ястребы, совы и т.д.) [Driesch, Boesneck, 1980]. Образцы семян, проанализированных R. Вухб (пшеницы, ячменя, гороха, чечевицы), показали, что земледелие было важным экономическим ресурсом.

В данной работе магнитные характеристики исследованного материала были использованы для получения информации об изменении окружающей среды во время существования поселения, в частности, был опробован новый метод оценки количества атмосферных осадков по степени гидратации магнетитовой фракции керамики.

Изначально, до момента захоронения керамика содержит магнетит и не содержит гидроокислов железа. Это очевидно, так как гидроокислы разлагаются при нагреве до температуры 150°C. После того, как керамика попадает в землю, магнетит в присутствии воды и кислорода может превращаться в гетит:



который покрывает поверхность зерен магнетита в виде ржавчины.

Вполне возможно, что такое превращение особенно интенсивно происходит в то время, когда керамика находится в приповерхностном слое отложений, при доступе кислорода и в присутствии бактерий, и замедляется, когда керамика оказывается захороненной глубже толщины поверхностно-активного слоя [Бураков и др., 2003]. Таким образом, в процессе гидратации сильномагнитный минерал - магнетит превращается в слабомагнитный гетит. Если вначале, до контакта с водой, керамика имела магнитную восприимчивость χ_0 , то в результате гидратации она уменьшается на величину $\Delta\chi$, пропорциональную той части магнетита, которая преобразовывается в гетит, а, следовательно, пропорциональную времени, в течение которого керамика контактировала с водой, находясь в поверхностно активном слое. Начальная магнитная восприимчивость керамики, которую мы измеряем перед нагревами, будет равна

$$\chi = \chi_0 - \Delta\chi.$$

При нагреве керамики во время лабораторных экспериментов выше 130°C гетит теряет воду и превращается в более магнитные минералы - маггемит и магнетит. В результате магнитная восприимчивость увеличивается пропорционально количеству гетита.

Относительная степень гидратации была оценена по изменению магнитной восприимчивости после нагрева до 130°C. Сглаженная кривая относительного изменения магнитной восприимчивости образцов $\Delta K/(K + \Delta K)$ после нагрева до 130°C во временном масштабе показана на рис. 9.

Видно, что во временной отрезок 1460–1430 гг. до н.э., соответствующий периоду накопления слоев культурных отложений в районе глубин

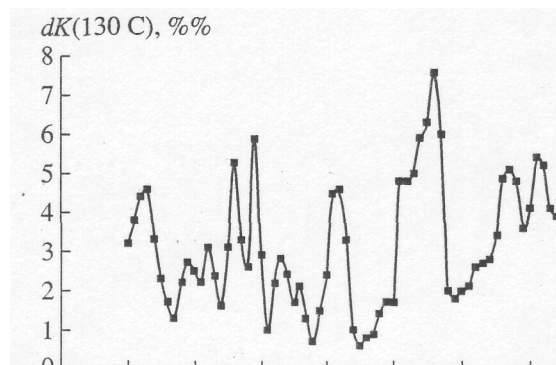


Рис. 9. Относительное изменение магнитной восприимчивости керамики из разреза археологического памятника "Азуер" после нагрева до 130°C в зависимости от времени отложения слоя, из которого она отобрана.

около 220–200 см, влажность достигает максимальных величин, и, как говорилось выше, об этом же свидетельствует вид культурных отложений на этой глубине. Вода попадала в слои с поверхности вследствие атмосферных осадков (дождей), причем эти атмосферные осадки не проникали на глубину более 100 см. В верхней части разреза видно уменьшение количества воды от поверхности до глубин 100–150 см, эта вода появлялась в результате дождей, которые происходили уже после окончания жизни поселения за прошедшие три с лишним тысячелетия; это может свидетельствовать о том, что климат в Ла-Манче во время существования поселения был даже более влажный, чем в последующее время, вплоть до современности. Наступление сухого периода, по-видимому, совпадает по времени с концом существования поселения. Возможно, наступившая засуха и была причиной того, что жители покинули его, как и другие поселения этого времени в Ла-Манче, переселившись в более влажные районы, в частности - вниз по течению Гвадианы, где новые поселения, например, "Passo Alto" [Soares A.M., 2003], появились как раз в период поздней бронзы.

Анализ построенной кривой показал, что количество осадков менялось со временем с периодом порядка 1650 лет. На эту основную тенденцию накладываются изменения в виде ряда всплесков, основные периоды в короткопериодной части спектра - 140, 74 и 33 года.

Вариации напряженности геомагнитного поля с такими характерными временами были обнаружены при исследовании изменения напряженности геомагнитного поля в последние тысячелетия. Таким образом, результаты данного исследования являются еще одним подтверждением боль-

шого сходства спектра вариации климатических и геомагнитных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены данные об изменении напряженности геомагнитного поля во II тысячелетии до нашей эры с подробностью, давшей уникальную возможность определить характеристики вариаций напряженности древнего поля с периодами в несколько десятков лет. Периоды выделенных вариаций – 66 и 120 лет, что хорошо согласуется с результатами исследований вариаций напряженности поля в последние тысячелетия и свидетельствует об устойчивости “короткопериодных” вариаций в голоцене. Амплитуды вариаций изменяются во времени.

Магнитные характеристики исследованного керамического материала были использованы для получения информации об изменении влажности климата. Обнаружено сходство спектров климатических и геомагнитных вариаций в диапазоне периодов десятки – первые сотни лет.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 03-05-64482.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бураков К.С. Комплекс аппаратуры для архео- и палеомагнитных исследований. 1999. М.: ОИФЗ РАН. 32 с.
- Бураков К.С. Древнее геомагнитное поле по результатам исследования разных видов намагниченности пород и материалов археологических памятников. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН. 2000. 42 с.
- Бураков К.С., Начасова И.Е. Введение поправки на химические изменения во время нагревов при определении напряженности древнего геомагнитного поля // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1985. № 10. С. 93–96.
- Бураков К.С., Начасова И.Е., Генералов А.Г. Вариации геомагнитного поля 13–2 тыс. лет назад (археомагнитные исследования материала памятника “Казачка”) // Физика Земли. 2003. № 7. С. 64–70.
- Начасова И.Е. Магнитное поле в районе Москвы с 1480 г. по 1840 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 1972. Т. 12. №2. С. 316.
- Начасова И.Е., Бураков К.С. Археоинтенсивность древнего геомагнитного поля в пятом тысячелетии до нашей эры в северной Месопотамии // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. № 3. С. 131–137.
- Начасова И.Е., Бураков К.С. Вариации напряженности геомагнитного поля в последние четыре тысячи лет по мировым данным // Докл. РАН. 1997. Т. 353. № 2. С. 255–257.
- Начасова И.Е., Бураков К.С. Вариации напряженности геомагнитного поля в VI–V тыс. до н.э. // Геомагнетизм и аэрономия. 1998. № 4. С. 125–129.

Начасова И.Е., Бураков К.С., Бернабеу Х. Археомагнитные исследования керамического материала многослойного неолитического памятника Испании “Cendres Cave” // Геомагнетизм и аэрономия. 2002а. Т. 42. № 6. С. 845–851.

Начасова И.Е., Бураков К.С., Бернабеу Х. Вариации напряженности геомагнитного поля в Испании // Физика Земли. 2002б. № 5. С. 24–29.

Fernandez-Miranda M., Fernandez-Posse Mo.D., Martin C. La Edad del Bronce en la Mancha Oriental // La Edad del Bronce en Castilla-La Mancha. Actas del Simposio 1990. Toledo. 1994. P. 243–287.

Fernandez-Posse M^a.D., Gilman A., Loetzerich R.M., Martin, C. Una aportación al estudio de los patrones de asentamiento durante la Edad del Bronce en la Mancha Oriental // 31 Congreso de Arqueología Peninsular (UTAD, Vila Real, Portugal, Setembro de 1999). Actas. V. 4. Pré-História Recente da Península Ibérica / P. Bueno, J.L. Cardoso, M. Díaz-Andreu, V. Hurtado, S.O. Jorge, V.O. Jorge (coord.). Porto. Adecap. 2000. P. 225–234.

Fernandez-Posse M^a.D., Gilman A., Martín C. Arqueología territorial. El ejemplo del poblamiento de la Mancha oriental // La Edad del Bronce, ¿Primera Edad de Oro de España? Sociedad, economía e ideología (M^a.L. Ruiz-Gálvez Priego, Coord.). Crítica. Barcelona. 2001. P. 121–137.

Genevey A., Gallet Y. Intensity of the geomagnetic field in western Europe over the past 2000 years: New data from ancient French pottery // J. Geophys. Res. 2002. 107(B11). 2285. doi:10.1029/2001JB000701.

Driesch A., von den Boessneck J. Die Motillas von Azuer und Los Palacios (Prov. Ciudad Real). Untersuchung der Tierknochenfunde // Studien über frühe Tierknochenfunde von der Iberischen Halbinsel 7. München. 1980. P. 84–121.

Mata C. Los Villares (Caudete de las Fuentes, Valencia). Origen y evolución de la Cultura Iberica. Trabajos Varios del Servicio de Investigación Prehistórica. 1991. № 88. Valencia. 308 p.]

Molina F., Najera T., Aguayo P. La Motilla del Azuer (Daimiel, Ciudad Real). Campaña de 1979 // Cuadernos de Prehistoria de la Universidad de Granada 4. Granada. 1979. P. 265–294.

Najera T., Molina F. La Edad del Bronce en La Mancha. Excavaciones en las motillas del Azuer y Los Palacios (Campaña de 1974) // Cuadernos de Prehistoria de la Universidad de Granada 2. Granada. 1977. P. 251–300.

Najera T., Molina F., Aguayo P., Martínez G. La Motilla del Azuer (Daimiel, Ciudad Real). Campaña de 1981 // Cuadernos de Prehistoria de la Universidad de Granada 6. Granada. 1981. P. 293–306.

Rodriguez M^a.O., Najera T., Ros M^a.T. Una valoración paleoecológica de la Motilla del Azuer a partir del análisis antracológico // Arqueometría y Arqueología / J. Capel, Ed. Monográfica Arte y Arqueología 47. Universidad de Granada. Granada. 1999. P. 11–23.

Soares A.M. O Passo Alto: uma fortificação única do Bronze Final do Sudoeste // Revista Portuguesa de Arqueologia. 2003. V. 6. № 2. P. 293–312.