

# Изменение магнитного момента Земли и климата в плейстоцене

Г. Н. Петрова, О. В. Пилипенко

Институт физики Земли РАН

О. М. Распопов

СПб филиал ИЗМИРАН, Санкт-Петербург

В. М. Трубихин

Геологический институт РАН

**Аннотация.** Построена сводная кривая зависимости  $VADM$  от возраста для последних 450 тыс. лет по 21 кривым из различных районов земного шара. Связь между изменениями магнитного момента и климата четко выражена для отрезков времени 90-0 и 342-198 тыс. лет. На временных интервалах, на которые приходится экскурсы Блейк, Бива-I, Бива-III происходит смена знака корреляции.

## Введение

Выяснение вопроса о связи между магнитным моментом Земли и климатом в последнее время занимает многих исследователей. Как обычно бывает с “модными” направлениями исследований, наряду с интересными и объективными данными в статьях по этому вопросу имеется немало спекуляций. Сейчас идет процесс накопления фактических данных. Не столь существенно, можно ли на основании имеющихся данных ответить на вопрос, существует ли связь между магнитным моментом Земли и климатом и какова эта связь. Важно, чтобы приведенные данные были елико возможно объективными.

## Изменение магнитного момента Земли и климата за последние 450 тыс. лет

На рис. 1 даны четыре кривые: две представляющие изменение магнитного момента Земли и две палеоклиматические. Изменения климата, связанные с изменениями магнитного поля Земли, – если такая связь действительно существует – могут иметь

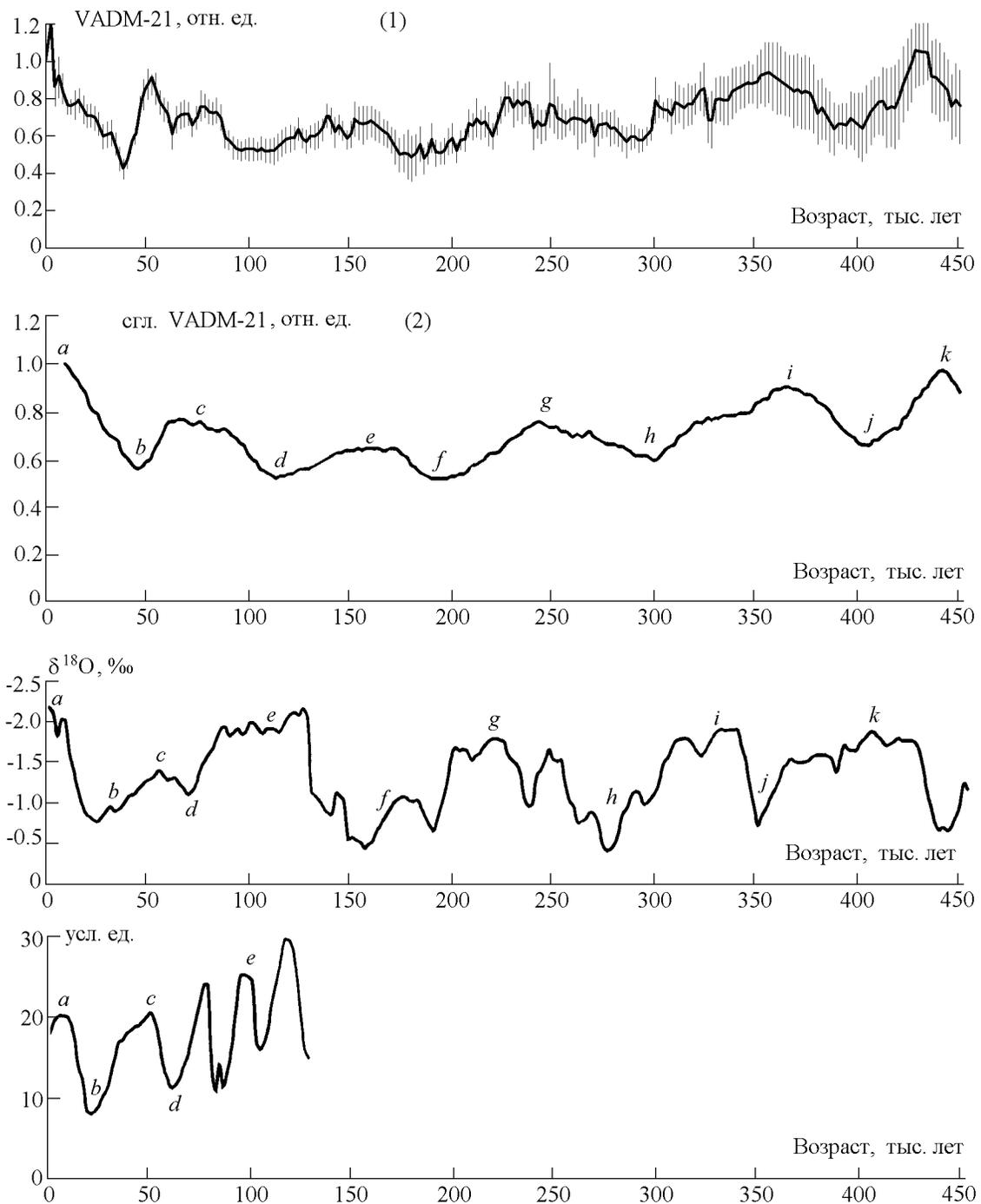
как региональный, так и глобальный характер. Изменение положения геомагнитной оси во время экскурсов – ее смещение в низкие широты – влечет за собою перераспределение градиента температуры и давления в магнитосфере и атмосфере, следующее за этим изменение перемещения циклонов, а значит, региональные изменения климата. Глобальные изменения климата могут быть связаны только с изменениями магнитного поля, имеющими глобальный характер не только по единому для всей Земли времени протекания, как это имеет место при экскурсах, но и при едином для всей Земли изменении величины рассматриваемого параметра. Таким параметром, естественно, является магнитный момент Земли.

Величина магнитного момента Земли вычисляется по значениям палеонапряженности, полученным в результате палеомагнитных исследований для определенного отрезка времени в определенном районе. Значения палеонапряженности пересчитываются в значения магнитного момента Земли по формуле дипольного поля. Поскольку дипольность геомагнитного поля для каждого времени подлежит проверке и поскольку при превалировании дипольной компоненты геомагнитное поле может иметь региональные особенности, как это наблюдается и в настоящее время, величины магнитного момента, полученные при пересчете данных отдельного региона, обозначаются  $VDM$  – виртуальный магнитный момент или  $VADM$  – виртуальный осевой магнитный момент, в зависимости от формулы пересчета. В настоящее время положение геомагнитной оси образует угол

©1999 Российский журнал наук о Земле.

Статья N RJE99026.

Онлайновая версия этой статьи опубликована 15 декабря 1999.  
URL: <http://eos.wdcb.rssi.ru/rjes/RJE99026/RJE99026.htm>



**Рис. 1.** Изменение магнитного момента Земли за 450 тыс. лет по мировым данным со стандартным отклонением среднего (1); сглаженная кривая VADM 20 тыс. летним окном (2); зависимость изотопного состава кислорода от возраста [Johnson, 1982] (3); модельная климатическая кривая [Imbrie and Imbrie, 1980] (4).

$\approx 11^\circ$  с осью вращения Земли, но осредненное за несколько тысячелетий положение геомагнитной оси, судя по палеомагнитным данным, совпадает с осью вращения Земли.

При подсчете среднего значения по кривым VADM (или VDM) из разных районов региональные особенности записи должны сглаживаться и полученная при такой процедуре кривая является отражением

изменений реального магнитного момента Земли, его дипольной части ( $DM$ ) с точностью, соответствующей современному этапу развития палеомагнитных исследований.

Кривые 1 и 2 на рис. 1 описывают изменения магнитного момента Земли за 450 тыс. лет. Они получены путем осреднения 21 кривой  $VADM$ , относящихся к разным районам земного шара. Табл. 1 содержит краткие сведения об использованных кривых: ссылку, район, координаты отбора, интервал времени, охваченный кривой, метод датировки, метод оценки палеонапряженности. Материалом палеомагнитных исследований во всех случаях кроме кривой 3 являются донные осадки. Как правило, кривые, приведенные авторами, являлись результатом сопоставления данных по нескольким кернам. Большинство авторов, прежде чем построить окончательный вариант кривой палеонапряженности ( $H_e$ ), для оценки  $H_e$  проводили нормировку NRM на несколько параметров, измеренных в лаборатории:  $k$ ,  $ARM$ ,  $SIRM$ , а также тем или иным методом проверяли неизменность состава и структуры ферромагнитной фракции вдоль керна.

На кривой 1 (рис. 1) изображены средние значения  $VADM$ , рассчитанные с равномерным шагом 2 тыс. лет, со стандартным отклонением среднего. Наименьшему стандартному отклонению соответствуют значения, рассчитанные с наибольшей точностью, обеспеченной увеличением числа участвующих в осреднении кривых. На этой кривой сохранены вариации, отражающие глобальные изменения геомагнитного поля. Кривая 2 (рис. 1) представляет собой результат скользящего сглаживания по 10 точкам кривой 1, на этой кривой отражены изменения магнитного момента с характерными временами больше 20 тыс. лет.

Кривые 3 и 4 (рис. 1) палеоклиматические. Они получены различными способами. Кривая 3 [Johnson, 1982] может быть названа “экспериментальной”. Она представляет собой известную изотопно-кислородную зависимость от возраста [Shackleton and Opdyke, 1997], полученную по вариациям  $\delta^{18}O$  в двух различных, независимых и однородных по составу глубоководных скважинах центральной части Тихого океана. Возраст экстремумов уточнен по радиоизотопным данным и астрономической кривой, отражающей связь инсоляции с изменением орбитальных параметров.

Кривая 4 [Imbrie and Imbrie, 1980] представляет собой результат моделирования климатических изменений под воздействием астрономических факторов, таких как светимость Солнца, положение и движение Земли в Солнечной системе (наклон ее оси вращения к плоскости орбиты, эксцентриситет, прецессия и др.). Эти факторы определяют колебания

характеристик орбитального движения и собственного вращения Земли, а следовательно, изменения инсоляции на внешней границе атмосферы.

Обращает на себя внимание, что две палеоклиматические кривые, экспериментальная и модельная, обнаруживают явное сходство за последние 86 тыс. лет, имеют общие черты в интервале времени 130–120 тыс. лет и совершенно непохожи в промежутке 120–86 тыс. лет. В этом нет ничего удивительного: климат определяется не только орбитальными факторами, но и рядом других: геофизическим, метеорологическим и т.д. [Монин, Шишков, 1979]. Именно к геофизическому фактору можно отнести магнитное поле Земли и, в частности, положение геомагнитной оси во время экскурсов. Не углубляясь в обсуждение этих причин, можно высказать предположение, что астрономический фактор был определяющим в последние 86 тыс. лет, а до этого его влияние на климат уступало другим факторам. На отрезок времени 120–90 тыс. лет приходится один из наиболее резко выраженных экскурсов эпохи Брюнес – Блейк, во время которого магнитный полюс ( $VGP$ ) дважды перемещался из полярной области северного полушария в полярную область южного полушария и обратно.

Логично ожидать, что соотношение изменений магнитного момента Земли и климатов для этих двух временных интервалов будет различно, независимо от того, какая причинно-следственная связь предполагается: независимое воздействие астрономических факторов как на магнитный момент, так и на климат, или модуляция потоков космических лучей магнитным моментом и связанные с этим климатические изменения.

Следует обратить внимание еще на одно обстоятельство. Если сопоставить максимумы и минимумы на двух палеоклиматических кривых, то экстремумы ( $a - \epsilon$ ) несомненно соответствуют друг другу, но их положения на шкале времени где-то совпадают (или почти совпадают), а где-то сдвинуты в ту ( $\epsilon$ ) или другую ( $a$ ) стороны. Шкала времени – самая уязвимая часть при геологических и палеомагнитных исследованиях и, если здесь упоминается расхождение для двух палеоклиматических кривых, то только потому, что такое же расхождение в пределах ошибки временной шкалы ожидает исследователя и при сопоставлении палеоклиматической кривой с кривой изменения магнитного момента.

В основном экстремумы кривой 3 опережают экстремумы кривой 4 (рис. 1) приблизительно на 5 тыс. лет. Это расхождение само по себе невелико, но при графических и математических оценках корреляции может обусловить появление закономерностей, являющихся по сути дела артефактами.

При визуальном сопоставлении кривой измене-

**Таблица 1.** Местоположение коллекций отбора, интервал времени и методы датировки и оценки палеонапряженности

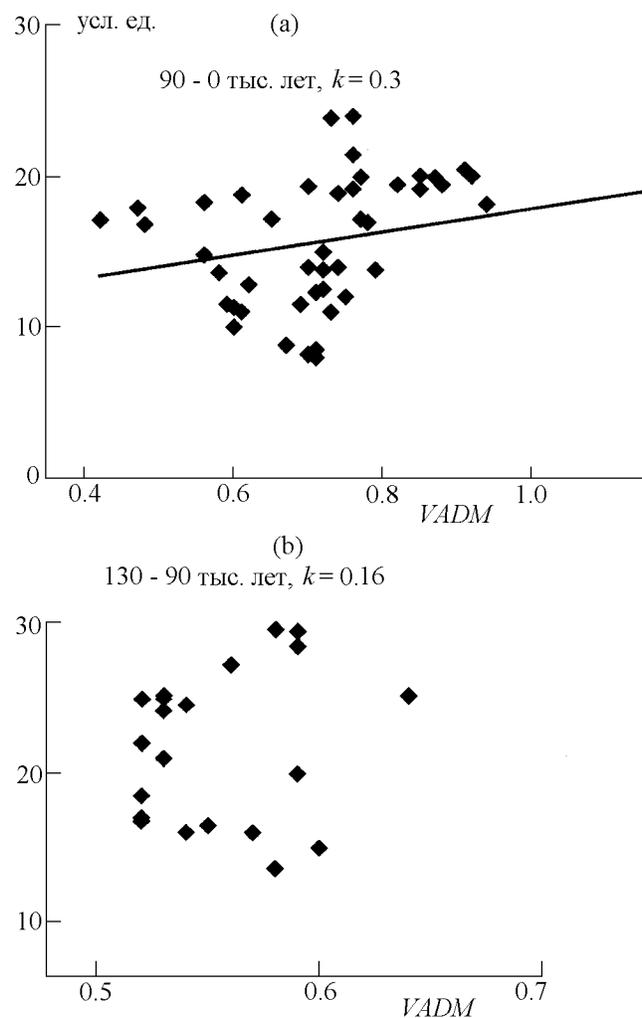
№ кривой	Авторы	Район	Координаты	Интервал времени в тыс. лет	Метод датировки	Метод оценки $H_e$
1	[ <i>Valet and Meynadier, 1993</i> ]	Экваториальная часть Тихого океана	$\varphi = 2^\circ \div 9^\circ \text{N}$ $\lambda = 120^\circ \div 160^\circ \text{E}$	450 ÷ 14	Вулканические данные, привязка к шкале Schnepf	$\frac{NRM}{ARM}$ $\frac{NRM}{k}$
2	[ <i>Tauke and Shackleton, 1994</i> ]	Экваториальная часть Тихого океана о. Ява	$\varphi = 2^\circ \text{N}$ $\lambda = 160^\circ \text{E}$	446 ÷ 6	$\delta^{18}\text{O}$	$\frac{NRM}{ARM}, \frac{NRM}{k}$ $\frac{NRM}{SIRM}$
3	[ <i>Петрова, 1998</i> ]	Армения, оз. Севан	$\varphi = 40^\circ \text{N}$ $\lambda = 45^\circ \text{E}$	0 ÷ 15 15 ÷ 25 25 ÷ 150 60 ÷ 340	Археоманитные данные $^{14}\text{C}$ $\text{Be}^{10}$ ТЛ*	$\frac{NRM}{k}$ $\frac{NRM}{SIRM}$ пересаживание
4	[ <i>Lehman et al., 1996</i> ]	Северная часть Атлантического океана	$\varphi = 38^\circ \text{N}$ $\lambda = 25^\circ \text{W}$	0 ÷ 260	$\delta^{18}\text{O}$	$\frac{NRM}{ARM}, \frac{NRM}{SIRM}$ $\frac{NRM}{k}$
5	[ <i>Weeks et al., 1995</i> ]	Северная часть Атлантического океана	$\varphi = 40^\circ \div 52^\circ \text{N}$ $\lambda = 22^\circ \div 32^\circ \text{W}$	4 ÷ 222	$\delta^{18}\text{O}$	$\frac{NRM}{ARM}, \frac{NRM}{SIRM}$
6	[ <i>Yamazaki and Ioka, 1994</i> ]	Экваториальная часть Тихого океана	$\varphi = 1^\circ \div 4^\circ \text{N}$ $\lambda = 135^\circ \div 138^\circ \text{E}$	2 ÷ 190	$\delta^{18}\text{O}$	$\frac{NRM}{ARM}$
7	[ <i>Meynadier et al., 1992</i> ]	Африка, о. Самали	$\varphi = 0^\circ \div 4^\circ \text{N}$ $\lambda = 46^\circ \div 51^\circ \text{E}$	18 ÷ 140	$\delta^{18}\text{O}$	$\frac{NRM}{ARM}$
8	[ <i>Creer and Morris, 1996</i> ]	Франция, о. Буше	$\varphi = 45^\circ \text{N}$ $\lambda = 4^\circ \text{E}$	15 ÷ 75	$K - Ar^{**}$	$\frac{NRM}{k}$
9	[ <i>Schneider and Mello, 1996</i> ]	Тихий океан, о. Суматра, Борнео	$\varphi = 9^\circ \text{N}$ $\lambda = 121^\circ \text{E}$	6 ÷ 128	$\delta^{18}\text{O}$ $^{14}\text{C}$	$\frac{NRM}{k}$
10	[ <i>Tric et al., 1992</i> ]	Средиземное море	$\varphi = 34^\circ \div 39^\circ \text{N}$ $\lambda = 9^\circ \div 33^\circ \text{E}$	78 ÷ 8	$\delta^{18}\text{O}$	$\frac{NRM}{ARM}, \frac{NRM}{k}$
11	[ <i>Поспелова, Шаронова, 1999</i> ]	Узбекистан, Приташкентский район	$\varphi = 41^\circ \text{N}$ $\lambda = 69^\circ \text{E}$	52 ÷ 11	ТЛ*	$\frac{NRM}{k}$

Таблица 1. Продолжение

№ кривой	Авторы	Район	Координаты	Интервал времени в тыс. лет	Метод датировки	Метод оценки $H_e$
12	[Schwartz and Lund, 1996]	Северная часть Атлантического океана	$\varphi = 22^\circ\text{N}$ $\lambda = 63^\circ\text{W}$	70 ÷ 12	$\delta^{18}\text{O}$	$\frac{NRM}{ARM}$
13	[Creer and Morris, 1996]	Южная Италия, к востоку от Неаполя	$\varphi = 41^\circ\text{N}$ $\lambda = 16^\circ\text{E}$	75 ÷ 15	$\delta^{18}\text{O}$	$\frac{NRM}{ARM}, \frac{NRM}{k}$ $\frac{NRM}{SIRM}$
14	[Kent and Opdyke, 1977]	Тихий океан	$\varphi = 33^\circ\text{N}$ $\lambda = 150^\circ\text{E}$	450 ÷ 2	по скорости осадконакопления от границы Матуяма-Брюнес	$\frac{NRM}{ARM}$
15	[Peck et al., 1996]	Сибирь оз. Байкал	$\varphi = 52^\circ \div 54^\circ\text{N}$ $\lambda = 107^\circ \div 108^\circ\text{E}$	84 ÷ 0	$^{14}\text{C}$ $\delta^{18}\text{O}$	$\frac{NRM}{ARM}$
16	[Channell et al., 1997]	Северная часть Атлантического океана	$\varphi = 60^\circ\text{N}$ $\lambda = 24^\circ\text{W}$	348 ÷ 0	$\delta^{18}\text{O}$	$\frac{NRM}{ARM}$ $\frac{NRM}{k}$
17	[Nowaczyk, 1997]	Гренландское море	$\varphi = 74^\circ\text{N}$ $\lambda = 8^\circ\text{W}$	246 ÷ 2	$\delta^{18}\text{O}$ $^{14}\text{C}$ $\delta^{13}\text{C}$	$\frac{NRM}{ARM}, \frac{NRM}{k}$ $\frac{NRM}{SIRM}$
18	[Zhu et al., 1994]	Китай	$\varphi = 37^\circ\text{N}$ $\lambda = 102^\circ\text{E}$	72 ÷ 130	$\delta^{18}\text{O}$ ТЛ*	$\frac{NRM}{k}$
19	[Stoner et al., 1995]	Лабрадорское море	$\varphi = 58^\circ\text{N}$ $\lambda = 48^\circ\text{W}$	102 ÷ 12	$\delta^{18}\text{O}$ $^{14}\text{C}$	$\frac{NRM}{k}, \frac{NRM}{SIRM}$
20	[Roberts et al., 1994]	США, Орегон, о. Чеванкан	$\varphi = 43^\circ\text{N}$ $\lambda = 221^\circ\text{E}$	104 ÷ 66	$K - \text{Ar}^{**}$ ТЛ*	$\frac{NRM}{ARM}$ $\frac{NRM}{k}, \frac{NRM}{SIRM}$
21	[Yamazaki and Ioka, 1994]	Экваториальная часть Тихого океана	$\varphi = 4^\circ\text{N} \div 14^\circ\text{S}$ $\lambda = 142^\circ\text{E} \div 170^\circ\text{W}$	450 ÷ 16	$\delta^{18}\text{O}$	$\frac{NRM}{ARM}$

ТЛ\* – термолюминесцентный метод.

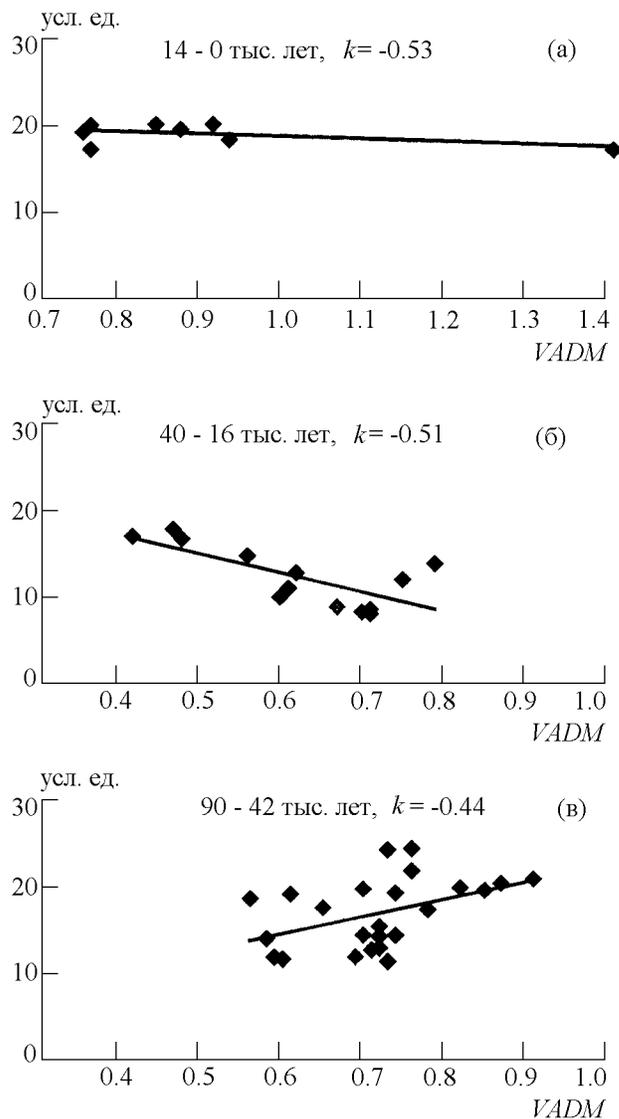
K – Ar\*\* – калий-аргоновый метод.



**Рис. 2.** Зависимость палеоклиматической характеристики по кривой [Imbrie and Imbrie, 1980] от  $VADM$  с указанием коэффициента корреляции, рассчитанного по изображенному количеству пар точек в следующих интервалах: а) 90–0 тыс. лет; б) 130–90 тыс. лет.

ния магнитного момента с палеоклиматическими кривыми можно заметить, что сходство наблюдается в том возрастном интервале, где отмечается сходство палеоклиматических кривых, т.е. от 90 тыс. лет и до современности. Кроме того сходство наблюдается в интервале от 350 тыс. лет до 210 тыс. лет. Между 208–130 тыс. лет и 450–400 тыс. лет можно заметить обратную корреляцию.

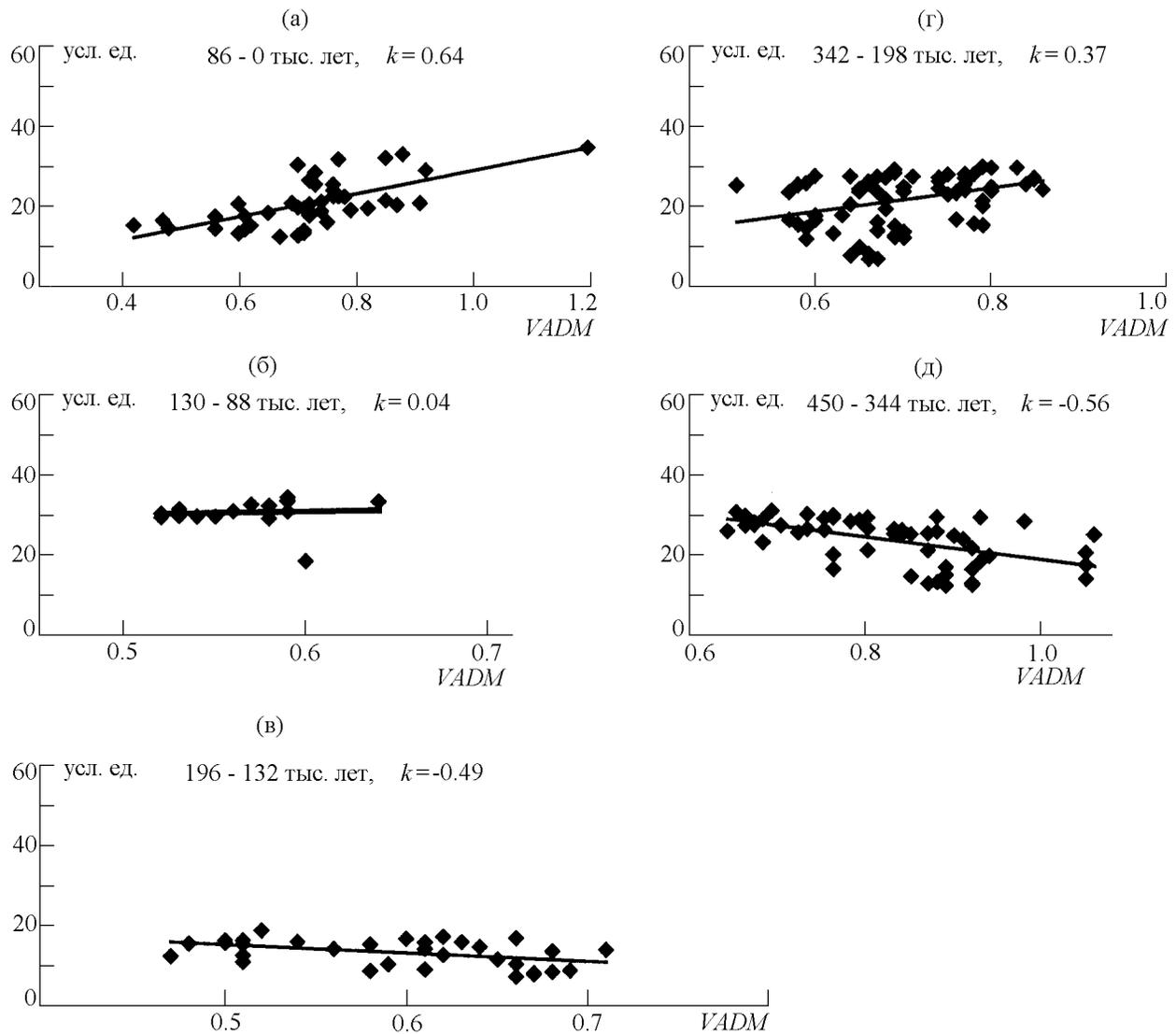
Это продемонстрировано на рис. 2 и 3, где для разных интервалов времени показана зависимость палеоклимата от величины магнитного момента. По оси абсцис на рис. 2 отложена величина  $VADM$  (по кривой 1 рис. 1), а по оси ординат характеристика палеоклимата в условных единицах, снятая с кривой



**Рис. 3.** Зависимость палеоклиматической характеристики по кривой [Imbrie and Imbrie, 1980] от  $VADM$  с указанием коэффициента корреляции, рассчитанного по изображенному количеству пар точек в следующих временных интервалах: а) 14–0 тыс. лет; б) 16–40 тыс. лет; в) 90–42 тыс. лет.

4 (рис. 1). Несмотря на разброс точек на рис. 2а видна тенденция согласованного изменения двух параметров, которая характеризуется высоким коэффициентом линейной корреляции  $k=0,3$  для исследуемых 46 пар точек. Это значимый коэффициент корреляции, т.к. вероятность встретить его у двух некоррелируемых рядов равна 5% [Тейлор, 1985].

Судя по рис. 2б, охватывающему интервал времени 130–90 тыс. лет, в это время корреляция между палеомагнитной и палеоклиматической кривыми практически отсутствует. Для исследуемых 21 пары



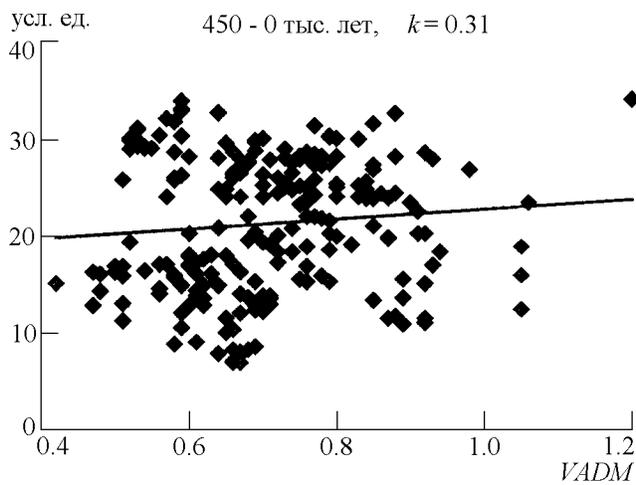
**Рис. 4.** Зависимость  $\delta^{18}O$  по данным [Johnson, 1982] от  $VADM$  с указанием коэффициента корреляции, рассчитанного по изображенному количеству пар точек в следующих временных интервалах: а) 86–0 тыс. лет; б) 130–88 тыс. лет; в) 196–132 тыс. лет; г) 342–198 тыс. лет; д) 450–344 тыс. лет.

точек  $k=0,16$ , что соответствует вероятности  $P \approx 50\%$  иметь такую корреляцию у двух некоррелируемых процессов. На это время приходится экскурс Блейк, возраст которого оценивается в пределах 120–90 тыс. лет, а продолжительность порядка 10 тыс. лет.

Если проводить сравнение кривых 1 и 3 на более коротких временных интервалах, то можно проследить поведение колебаний с иными характерными временами. Так из рис. 3 видно, что корреляция положительная от 90 до 40 тыс. лет и отрицательная от 40 тыс. лет до современности.

Сопоставление кривой 1 изменения магнитного момента с палеоклиматической кривой 3 (рис. 1) позво-

ляет обнаружить прямую корреляцию этих кривых для последних 86 тыс. лет с коэффициентом линейной корреляции  $k=0,64$  для исследуемых  $N=44$  пар точек ( $P \leq 0,05\%$ , угол наклона прямой регрессии  $\alpha \approx 11^\circ$ ), (см. рис. 4а). Это хорошо согласуется с результатами сравнения кривых 1 и 4, о чем написано выше (рис. 2а). Группа точек 130–88 тыс. лет лежит отдельно, как и на рис. 2б, и угол наклона прямой линейной регрессии близок к нулю (рис. 4б), а в интервалах времени 196–132 тыс. лет ( $k = -0,49$ ,  $N=65$ ,  $P \leq 0,05\%$ ,  $\alpha \approx 5^\circ$ ), и в 450–344 тыс. лет ( $k = -0,56$ ,  $N=54$ ,  $P \leq 0,05\%$ ,  $\alpha \approx 7^\circ$ ) имеется высокозначимая отрицательная корреляция (рис. 4в, д). На обшир-



**Рис. 5.** Зависимость  $\delta^{18}O$  по данным [Johnson, 1982] от  $VADM$  за 450 тыс. лет за исключением временного интервала, относящегося ко времени протекания экскурса Блейк (120–90 тыс. лет).

ном временном отрезке 342–198 тыс. лет существует положительная высокосignificant корреляция ( $k=0,37$ ,  $N=73$ ,  $P \leq 0,05\%$ ,  $\alpha \approx 8^\circ$ ), (рис. 4г). Различный знак корреляции, по всей видимости, означает сдвиг экстремумов, т.е. связан с неточностями шкалы времени использованных кривых (скорее всего, климатической кривой, поскольку сводная кривая  $VADM$  является результатом осреднения 21 кривой).

На рис. 5 представлена вся сумма точек за 450 тыс. лет за исключением интервала, относящегося ко времени протекания экскурса Блейк. Для исследуемого количества пар точек ( $N=212$ ) можно заметить высокосignificant корреляцию ( $k=0,31$ ,  $P \leq 0,05\%$ ,  $\alpha \approx 5^\circ$ ) в сравнении с корреляцией всего временного интервала.

## Обсуждение результатов

Во введении было сказано, что на данном этапе исследований взаимосвязи магнитного поля Земли и климата главной задачей является накопление объективной информации. Насколько объективными можно считать данные, использованные для сопоставления в настоящей статье?

Кривые изменения магнитного момента Земли можно считать достоверными, т.е. адекватно отражающими реально происходившие изменения магнитного момента. Кривая 1 является результатом осреднения 21 кривой, полученных различными авторами по разным районам земного шара. Ошибки палеомагнитного метода – неверная привязка к шкале времени, неудачный выбор параметра норми-

ровки остаточной намагниченности, неучтенные изменения ферромагнитной фракции, все эти случайные ошибки должны скомпенсироваться при осреднении. Единственная ошибка, которую можно считать систематической для всего статистического ансамбля – запаздывание палеомагнитной записи, приводит к удревнению записи. Она зависит, прежде всего, от скорости осадконакопления и, в худшем случае, на отдельной записи не превышает 10 тыс. лет, а при осреднении может сдвинуть палеомагнитную запись по шкале времени на 5 тыс. лет. Кривая 2 получена путем сглаживания кривой 1 скользящим окном 20 тыс. лет.

Палеоклиматическая кривая 3, заимствованная из работы [Johnson, 1982], является одной из многих экспериментальных палеоклиматических кривых, и выбрана как типичная по числу экстремумов и их расположению на шкале времени. Кривая 4 [Imbrie and Imbrie, 1980] – модельная, она справедлива в той мере, в какой верны предположения, заложенные в модель. Автор этой кривой подтверждает ее правильность сопоставлением с палеоклиматическими экспериментальными данными. Численное выражение связи поступления на Землю солнечной энергии с орбитальными параметрами имеет варианты, но при любых вариантах число максимумов и минимумов не должно меняться.

Идея осреднения палеоклиматических кривых 3 и 4 подобно тому, как это было сделано с палеомагнитными кривыми, авторами настоящей работы была отброшена. При обработке палеомагнитных кривых осредняются одинаково полученные численные значения. Палеоклиматические кривые построены по разным исходным данным. Хотя климатическая кривая 3 и дает относительное изменение  $\delta^{18}O$ , которое отражает изменение климата, но сама эта связь является неоднозначной.

Визуальное сравнение показывает, что число экстремумов как на палеомагнитной кривой 1 так и на сглаженной кривой 2 и на кривой 3 совпадает. Результат такого сравнения, при всей его грубости, надо считать значимым, поскольку он лежит в пределах всех возможных ошибок построения кривых.

Графики зависимости параметра, характеризующего палеоклимат от величины  $VADM$  показывают, что для большей части времени в промежутке от 450–0 тыс. лет корреляция существует, пусть не очень четко выраженная, причиной чего может быть небольшой сдвиг максимумов и минимумов сравниваемых кривых. В основном экстремумы на палеомагнитной кривой опережают экстремумы на палеоклиматической. Систематическая ошибка, связанная с запаздыванием палеомагнитной записи по отношению ко времени осадконакопления, тоже приведет к опережению появления экстремумов на па-

леомагнитной кривой. При учете сказанного выше трудно было ожидать высоких коэффициентов корреляции для всего исследуемого интервала времени при математическом анализе палеомагнитных и палеоклиматических кривых. Результаты корреляционного анализа позволили сформулировать то же заключение, которое было сделано на основе визуального и графического сравнения временных рядов: отрицать корреляцию палеомагнитной и палеоклиматической кривых нельзя, хотя не на всех временных интервалах она выражена четко.

Кривая изменения магнитного момента во времени, подобная кривой 1 на рис. 1, приводится в работе [Guyodo and Valet, 1999]. Она построена по осреднению 33 палеомагнитных записей для всего хрона Брюнес (780 тыс. лет) и является наиболее длительной и достоверной зависимостью изменения палеонапряженности от времени. Авторы подтверждают приуроченность экскурсов к интервалам пониженных значений палеонапряженности, которое отмечалось рядом авторов, в том числе и авторами данной статьи [Петрова, 1998; Петрова и др., 1992]. Авторы настоящей статьи не присоединяются к предположению, что наблюдаемый эффект связан с перераспределением соотношения дипольной и недипольной составляющих геомагнитного поля во время экскурсов. Визуально отмечаемое различие и коэффициенты корреляции для кривых *VADM* из одного и разных районов не подтверждают такого предположения [Петрова, Пилипенко, 2000]. На настоящем этапе изучения связи экскурсов с изменениями магнитного момента и с изменениями климата основную ценность представляет фактический материал, по которым данные Гуодо, Вале занимают первое место.

Как и во всех работах по приуроченности экскурсов к геомагнитным, астрономическим и климатическим изменениям, не все экскурсы на кривой Гуодо, Вале опускаются ниже уровня критических значений магнитного момента. Экскурсы Бива-II и Бива-III не отвечают предложенным в их статье критериям. В работе [Rampino, 1979] экскурс Дельта-Елунино-7 (690–600 тыс. лет) также не подчиняется выявленной автором закономерности, то есть не приходится на нисходящую ветвь эксцентриситета. На кривой 1 рис. 1 экскурсу Блейк не соответствует резкий минимум дипольного момента. Причины таких расхождений могут заключаться в произвольности выбора критического уровня магнитного момента (в результатах Гуодо, Вале) или в неточности датировок экскурсов, особенно древних (в сопоставлениях Рампино).

Авторам настоящей статьи кажется, что их позиции в обсуждаемом вопросе очень близки (или совпадают) с теми, что высказываются в работе [Lan-

gerais, 1999]. Ланжерайс пишет, что встречающиеся у многих авторов утверждения о несомненной корреляции палеомагнитных и палеоклиматических данных основано на спорных сопоставлениях. Так, например, сходство спектров вариаций магнитной восприимчивости угловых элементов *NRM* связано, как утверждает Ланжерайс, с некорректностью проведения эксперимента: неправильным анализом постоянства состава ферромагнитной фракции, неверной нормировкой  $J_n$  и другими подобными причинами. Авторы настоящей статьи пытались показать, что в своих сопоставлениях соблюдали осторожность и, приводя полученные при сопоставлении результаты, воздерживаются от сколько-нибудь категорических выводов.

## Выводы

На протяжении 450 тыс. лет между изменениями магнитного момента и изменениями климата существовала связь. Эта связь четко выражена для отрезков времени, когда модельная и экспериментальная палеоклиматические кривые похожи ( $\approx 90-0$  тыс. лет), т.е. когда основным фактором, определяющим климат, является инсоляция, поступление которой контролируется орбитальными параметрами Земли, и в интервале  $\approx 342-198$  тыс. лет. Существование корреляции между изменениями геомагнитного поля и климатическими изменениями означает, что существует физический механизм, контролирующий поступление солнечной энергии к земной поверхности при изменении геомагнитного поля. На отрезках времени, на которые падают экскурсы Блейк ( $\approx 120-90$  тыс. лет), Бива-I ( $\approx 200-180$  тыс. лет) и Бива-III ( $\approx 400-380$  тыс. лет) происходит смена знака корреляции, что проявляется в очень низких значениях линейного коэффициента корреляции. В интервалах времени  $\approx 196-132$  тыс. лет и в  $\approx 450-344$  тыс. лет наблюдается обратная корреляция.

**Благодарность.** Авторы выражают глубокую благодарность А. Г. Гамбурцеву за полезные обсуждения в процессе работы. Работа выполнена при финансовом содействии INTAS (грант № 31008) и РФФИ грант № 97-05-65510.

## Литература

- Монин А. С., Шишков Ю. А., *История климата*, 408 с., Гидрометеиздат, Ленинград, 1979.  
 Петрова Г. Н., Изменение магнитного момента Земли за последние 340 тыс. лет, *Физика Земли*, 10, 48–54, 1996.  
 Петрова Г. Н., Планетарные черты изменения палеонапряженности за последние 300 тысяч лет, *Физика Земли*, принята в печать в 1998.

- Петрова Г. Н., Пилипенко О. В., Внутриврегиональные и межрегиональные корреляции изменений палеонапряженности в позднем плейстоцене, *Физика Земли*, 3-4, 2000.
- Петрова Г. Н., Нечаева Т. Б., Поспелова Г. А., *Характерные изменения геомагнитного поля в прошлом*, 173 с., Наука, Москва, 1992.
- Поспелова Г. А., Шаронова З. В., Напряженность геомагнитного поля 53-22 тыс. лет т.н., *Физика Земли*, 9, 1-10, 1999.
- Тейлор Дж., *Введение в теорию ошибок*, 272 с., Мир, Москва, 1985.
- Channell J. E. T., Hodell D. A., and Lehman B., Relative geomagnetic paleointensity and  $\delta^{18}O$  at ODP Site 983 (Gardar Drift, North Atlantic) since 350 ka, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 153, 103-118, 1997.
- Creer K. M., Thouveny N., and Blunk I., Climatic and geomagnetic influences on the Lac du Bouchet paleomagnetic SV record through the last 110,000 year, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 64, (2-4), 314-341, 1990.
- Creer K. M., and Morris A., Proxy-climate and geomagnetic palaeointensity records extending back to ca. 75,000 BP derived from sediments cored from Lago Grande di Monticchio, southern Italy, *Quaternary Sci. Rev.*, 15, 167-189, 1996.
- Guyodo Y., and Valet J.-P., Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr, *Nature*, 399, 249-252, 1999.
- Johnson R. G., Brunhes-Matuyama magnetic reversal dated at 79,000 yr b.p. by Marine-Astronomical correlations, *Quaternary Res.*, 17, 135-147, 1982.
- Imbrie J., and Imbrie J.-Z., Modeling the climatic response to orbital variations, *Science*, 207, (4434), 943-953, 1980.
- Kent D. V., and Opdyke N. D., Paleomagnetic field intensity variation recorded in a Brunhes epoch deep-sea sediment core, *Nature*, 266, 156-159, 1977.
- Langereis C. G., Excursions in geomagnetism, *Nature*, 399, 207-208, 1999.
- Lehman B., Laj C., Kissel C., et al., Relative changes of the geomagnetic field intensity during the last 280,000 years obtained from piston cores in the Acores Area, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 93, 269-284, 1996.
- Meynadier L., Valet J.-P., Weeks R., et al. Relative geomagnetic intensity of the field during the last 140 ka, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 114, 39-57, 1992.
- Nowaczyk N. R., High-resolution magnetostratigraphy of four sediment cores from the Greenland Sea-II, Rock magnetic and relative palaeointensity data, *Geophys. J. Inter.*, 131, 325-334, 1997.
- Peck J. A., King J. W., Colman S. M., and Kravchinsky V. A., An 84 kyr-paleomagnetic record from the sediments of lake Baikal, Siberia, *J. Geophys. Res.*, 101, (B5), 11,365-11,385, 1996.
- Rampino M. R., Possible relationships between changes in global ice volume, geomagnetic excursions and the eccentricity of the Earth's orbit, *Geology*, 7, 584-587, 1979.
- Roberts A., Verozub K. L., and Negrini R. M., Middle/Late Pleistocene relative palaeointensity of the geomagnetic field from lacustrine sediments, Lake Chewaucan, western United States, *Geophys. J. Inter.*, 123, 101-110, 1994.
- Schwartz M., and Lund S. P., Environmental factors as complicating influences in the recovery of quantitative geomagnetic-field paleointensity estimates from sediments, *Geophys. Res. Lett.*, 23, (19), 2693-2696, 1996.
- Schneider D. A., and Mello G. A., A high-resolution marine sedimentary record of geomagnetic intensity during the Brunhes Chron, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 144, 297-314, 1996.
- Shackleton N. J., and Opdyke N. D., Oxygen isotope and palaeomagnetic evidence for early Northern Hemisphere glaciation, *Nature*, 270, (5634), 216-219, 1997.
- Stoner J. S., Channell J. E. T., and Hillaire-Marcel C., Late Pleistocene relative geomagnetic paleointensity from the deep Labrador Sea: Regional and global correlations, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 134, 237-252, 1995.
- Tauxe L., and Shackleton N. J., Relative palaeointensity records from the Ontong-Java Plateau, *Geophys. J. Inter.*, 117, 769-782, 1994.
- Tric E., Valet J.-P., Tucholka P., et al. Paleointensity of the geomagnetic field during the last 80,000 years, *J. Geophys. Res.*, 97, (B6), 9337-9351, 1992.
- Valet J.-P., and Meynadier L., Geomagnetic field intensity and reversals during the past four million years, *Nature*, 366, 234-238, 1993.
- Weeks R.J., Laj C., Endignoux L., et al., Normalised natural remanent magnetisation intensity during the last 240,000 years in piston cores from the central North Atlantic Ocean: geomagnetic field intensity or environmental signal? *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1987, 213-229, 1995.
- Yamazaki T., and Ioka N., Long-term secular variation of the geomagnetic field during the last 200 kyr recorded in sediment cores from the western equatorial Pacific, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 128, 527-544, 1994.
- Yamazaki T., Ioka N., and Eguchi N., Relative paleointensity of the geomagnetic field during the Brunhes Chron, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 136, 525-540, 1995.
- Zhu R. X., Zhou L. P., Laj C., Mazaud A., and Ding Z. L., The Blake geomagnetic polarity episode recorded in Chinese Loess, *Geophys. Res. Lett.*, 21, (8), 697-700, 1994.

(Поступила в редакцию 15 ноября 1999.)