

ПАЛЕОКЛИМАТ

УДК 550.382.3: 551.461.8:551.583.7

**ПЕТРОМАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДОННЫХ ОСАДКОВ КАК ИНДИКАТОРЫ
ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И СРЕДЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ОХОТСКОГО МОРЯ
ЗА ПОСЛЕДНИЕ 350 ТЫС. ЛЕТ**

М.И. Малахов, С.А. Горбаренко*, Г.Ю. Малахова, Н. Харада, Ю.П. Василенко*,
А.А. Босин*, Е.Л. Гольдберг***, А.Н. Деркачев***

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, 685000, Магадан, ул. Портовая, 16, Россия

** Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия*

*** Institute of Observational Research for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,
Yokosuka, 690 Sekine, Mutsu 035-0022, Japan*

**** Институт археологии и этнографии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Лаврентьева, 17, Россия*

В осадках из центральной части Охотского моря, обеспеченных предварительной возрастной шкалой, исследованы петромагнитные параметры двух групп образцов, сформировавшихся в надежно датированные холодные и теплые климатические периоды. Во время теплых изотопно-кислородных стадий и подстадий в осадках наряду с псевдооднодоменным аллотигенным магнетитом преобладала значительная доля биологически контролируемых зерен магнетита и грейгита (пирротина). В холодные периоды накапливались отложения, содержащие смесь псевдооднодоменных и многодоменных частиц терригенного магнетита. Кривые изменения петромагнитных параметров по разрезу колонки хорошо коррелируются с нормализованной стандартной изотопно-кислородной кривой для последних 350 тыс. лет.

Донные осадки, петромагнетизм, относительная палеонапряженность, магнетоклиматические параметры, изменения палеоклимата, поздний плейстоцен, Охотское море.

**PETROMAGNETIC PARAMETERS OF BOTTOM SEDIMENTS AS INDICATORS OF THE CLIMATIC
AND ENVIRONMENTAL CHANGES IN THE CENTRAL ZONE OF THE SEA
OF OKHOTSK DURING THE LAST 350 KYR**

**M.I. Malakhov, S.A. Gorbarenko, G.Yu. Malakhova, N. Harada, Yu.P. Vasilenko, A.A. Bosin,
E.L. Gol'dberg, and A.N. Derkachev**

Bottom sediments from the central zone of the Sea of Okhotsk were preliminarily dated. The petromagnetic parameters of two groups of samples formed at cold and warm climatic stages were studied. Warm oxygen isotopic stages and substages were characterized by the coexistence of pseudo-single-domain allogenic magnetite and predominant magnetite and greigite (pyrrhotite) grains subject to biologic control. At cold stages, sediments containing a mixture of pseudo-single-domain and multidomain terrigenous magnetite particles accumulated. The petromagnetic curves agree with the normalized standard oxygen isotopic curve over the last 350 kyr of the column section.

Bottom sediments, petromagnetism, relative paleointensity, magnetoclimatic parameters, paleoclimatic changes, Late Pleistocene, Sea of Okhotsk

ВВЕДЕНИЕ

Реконструкция климата и окружающей среды в геологическом прошлом для различных районов Земли является основой для решения важнейшей проблемы — прогноза предстоящих климатических изменений в региональном и глобальном масштабах. Исследователи используют различные методы: литологические, палеонтологические и физические. Например, по ледовому керну Гренландии было определено, что температура региона в прошлом изменялась на 9—17 °С в течение нескольких десятилетий, и такие быстрые осцилляции климата (Дансгор-Ошгер интерстадиаль-потепления (ДОИ) и стадиаль-похолодания (ДОС) [Dansgaard et al., 1993]) повторялись во время оледенений с периодичностью 2—3 тыс. календарных лет (тыс. к.л.). Позднее аналогичные быстрые изменения климата были найдены в

других регионах Северного полушария, а в осадках Северной Атлантики были зарегистрированы экстремальные похолодания, связанные с частичным распадом покровных ледников и накоплением ледниковых осадков, повторяющиеся через 7—9 тыс. к.л. (холодные Хейнрих события (ХС) [Heinrich, 1988]). По кернам льда Антарктиды также были выявлены аналогичные Дансгор-Ошгер (ДО) климатические циклы за период 800 тыс. к.л. [Jouzel et al., 2007], но они происходили в противофазе с быстрыми климатическими изменениями Северного полушария. Изучение источников и механизмов передачи быстрых изменений климата между высокими широтами полушарий, включая роль переключений термохалинной циркуляции и изменений глобальной атмосферной циркуляции, представляется первоочередной задачей.

Уникальное географическое положение Охотского моря (ОМ) между Сибирским зимним максимумом атмосферного давления и Алеутским минимумом с сезонным покрытием его морскими льдами обуславливают его высокую чувствительность к быстрым изменениям атмосферной циркуляции и климата. В работе [Gorbarenko et al., 2007] по результатам высокоразрешающего изучения датированных осадков Охотского моря за последние 80 тыс. к.л. были выявлены быстрые потепления и похолодания климата региона, синхронные климатическим циклам Гренландии. При этом наиболее холодные осцилляции, эквивалентные Хейнрих событиям (ХЭС), происходили при значительных потеплениях Антарктиды [Sirocko et al., 2005]. Поэтому высокоразрешающее сопоставление климатических изменений за последние сотни тысяч лет в высоких широтах для Северного полушария может быть получено на основании комплексного изучения осадков Охотского моря, которые дополняют известные сведения по Гренландии и Атлантике.

Хорошая сходимость кривых хода магнитной восприимчивости и изотопных записей по океанским колонкам привела к тому, что в практику изучения палеоклимата успешно начал внедряться новый физический метод — петромагнитный [Матасова и др., 2003; Nourgaliev et al., 2005]. Данный метод [Печерский, 1985], изучающий концентрацию, состав и магнитное состояние (доменную структуру) зерен, может быть причислен к экспресс-методу получения различных скалярных магнитных сигналов вдоль изучаемого разреза, так как все осадочные породы содержат в различной концентрации частицы железистых минералов. Опыт последнего десятилетия определил набор магнитных параметров и их соотношений, которые отражают изменения среды и климата района исследований.

Совокупность основных петромагнитных параметров включает в себя [Шолпо, 1977]: магнитную восприимчивость (K) или индуцированную намагниченность ($K \cdot B$) в геомагнитном поле B ; безгистерезисную (идеальную) остаточную намагниченность (J_{rs} , ARM); изотермическую остаточную намагниченность насыщения (J_{rs}); намагниченность (J_p) парамагнитной компоненты в поле 0.5 Тл; намагниченность насыщения (J_s) за вычетом парамагнитной компоненты; индуцированную намагниченность в поле 0.5 Тл до высокотемпературного нагрева (J_{s1}) и после (J_{s2}); коэрцитивную силу (B_c) намагниченности насыщения за вычетом влияния парамагнитной компоненты; коэрцитивную силу (B_{cr}) остаточной намагниченности насыщения; положение максимумов (B_{da} , B_{db}) коэрцитивного спектра (нормальное намагничивание вдоль осей a и b соответственно диаграммы Прейзаха—Нееля). Авторами также приводится оценка величины предельной ориентационной остаточной намагниченности ($C \cdot m$) [Малахов и др., 2007а].

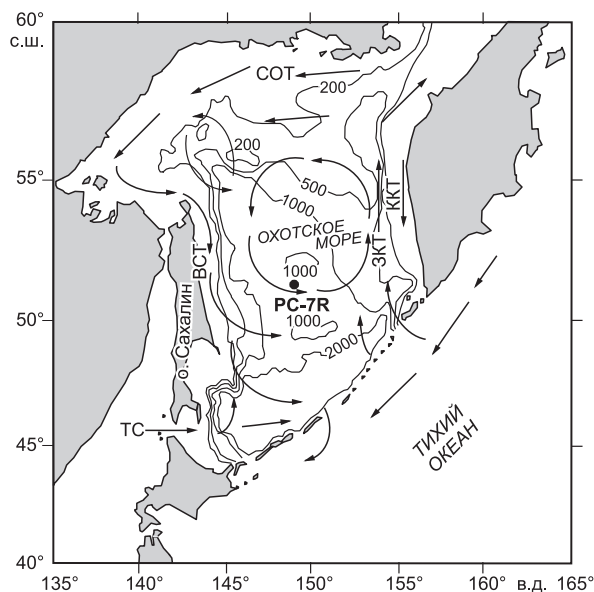
Проведенные исследования позволили получить ответ на два вопроса: первый — какие скалярные магнитные параметры донных осадков, наряду с магнитной восприимчивостью, чувствительны к изменениям среды и климата и можно ли их отнести к климатически информативным; второй — каков возможный механизм записи климатического сигнала петромагнитными параметрами.

ОБЪЕКТЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Колонка MR 06-04 PC-7R (51°16.87' с.ш., 149°12.57' в.д., глубина моря 1256 м, длина керна 1720 см) была отобрана поршневым пробоотборником из центральной части Охотского моря во время российско-японской экспедиции в 2006 г. на исследовательском судне «Mirai» (рис. 1). Первичные замеры магнитной восприимчивости и плотности осадка

Рис. 1. Схема расположения колонки MR 06-04PC-7R.

Стрелками указана циркуляция поверхностных вод. Течения: ВСТ — Восточно-Сахалинское, СОТ — Северо-Охотское, ЗКТ — Западно-Камчатское, ККТ — компенсационное Камчатское, ТС — Соя.



(г/см³) проводились на ненарушенном керне посредством системы ГЕОТЕК через 1 см. Влагосодержание (%) определялось стандартным способом с тем же шагом. В качестве индикатора ледового разноса определялась весовая доля крупной фракции (мас.%) осадка более 63 и менее 2000 мкм, которая аккумулируется на дне Охотского моря при весеннем таянии морских льдов. Концентрация хлорина (IgC_{Cl}), как индикатора палеопродуктивности, измерялась посредством спектрофотометра Shimadzu UV-1650PC по стандартной методике [Harris et al., 1996; Захарков и др., 2007]. Ориентированные образцы с ребром куба 2.4 см отбирались непрерывно по длине керна [Малахов, 1989]. Последовательно с каждого горизонта мощностью в 10 см формировались пробы на петромагнитный анализ. Детальность увеличивалась при наличии пепловых прослоев: K_2 , MR_2 и MR_3 . Последние два являются аналогами AL 7.2 и AL 9.22, найденными в колонке LV 28-42-4 [Nürnberg, Tiedermann, 2004]. Абсолютный возраст основных пепловых прослоев Охотоморского региона хорошо известен и используется как независимый способ хронометрирования осадочных горизонтов ОМ [Gorbarenko et al., 2002; Nürnberg, Tiedermann, 2004].

Для изучения магнитных характеристик использовалось оборудование российского и чешского производства (Казанский университет, Рудгеофизика, фирма AGICO). Сначала был измерен тензор магнитной восприимчивости прибором KLY-2. Минералы-носители естественной остаточной намагниченности NRM были определены по параметрам магнитного гистерезиса и методами дифференциального термомагнитного анализа по остаточной намагниченности насыщения и намагниченности насыщения. Оригинальные приборы — магнитные весы Фарадея и коэрцитивный спектрометр — разработаны и изготовлены в Казанском университете [Буров, Ясонов, 1979; Буров и др., 1986; Iasonov et al., 1998; Enkin et al., 2007]. Модуль и направление NRM измерялись на рок-генераторах (ИОН-1, JR-5A). Предварительно было проведено поэтапное размагничивание контрольной группы образцов переменным магнитным полем спадающей до нуля амплитудой. Векторные диаграммы Зийдервельда получены в переменных магнитных полях до 100 мТл с шагом 5 мТл на приборе LDA-2A. В процессе магнитной чистки полями более 15 мТл направление NRM практически не менялось. Разрушающее медианное поле составило 35—40 мТл. Вязкая компонента уверенно удалялась воздействием переменными магнитными полями интенсивностью до 15—20 мТл. Таким образом, магнитная чистка с максимальной амплитудой переменного магнитного поля до 20 мТл была выбрана как оптимальная для выделения характеристической (ChRM) палеомагнитно-информативной компоненты NRM. Правильность выводов, полученных по контрольной совокупности образцов, подтвердило подобие угловых характеристик ChRM при чистке образцов по всему разрезу колонки РС-7R последовательно в полях 20 и 30 мТл. Безгистерезисная остаточная намагниченность ARM (постоянное поле 0.05 мТл, максимальное переменное — 100 мТл) создавалась в образцах, предварительно приведенных в нулевое магнитное состояние, с помощью устройства AMU-1A.

Для решения поставленной задачи отобраны две группы образцов из осадочных горизонтов, формировавшихся в климатические фазы явно теплого (I группа) и холодного (II группа) периодов. Образцы этих групп существенно различались величиной магнитной восприимчивости — у II группы она выше в 2—4 раза, чем у образцов I группы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Возраст осадочных горизонтов колонки РС-7R. Конструирование временного масштаба выполнено на основе тефрохронологии, сравнения изменения магнитной восприимчивости, весового содержания крупной фракции ледового разноса, влагосодержания и содержания хлорина, цветности (в зарубежной литературе — color «b») и плотности осадка с морскими изотопно-кислородными стадиями (ИКС) [Bassinot et al., 1994; Landais et al., 2006; Jouzel et al., 2007]. Сначала возрастные построения выполнены для последних 190 тыс. к.л. [Горбаренко и др., 2007, 2008], затем — для остальной части колонки [Малахов и др., 2007а,б].

Полученные записи ОМ за последние 350 тыс. лет (ИКС 1-10) демонстрируют изменения климата и среды моря, обусловленные орбитальными вариациями инсоляции, и тысячетлетние осцилляции значительных похолоданий — ХЭС (рис. 2). Увеличение магнитной восприимчивости, крупной фракции, плотности и уменьшение влагосодержания осадка во время холодных ИКС 2, 4, 6, 8 и 10 были инициированы похолоданием климата, усилением привноса грубого терригенного материала и уменьшением поступления биогенной компоненты. Уменьшение хлорина в холодные ИКС соответствует установленному ранее снижению продуктивности Охотского моря в оледенения [Горбаренко и др., 2003]. Аналогичный характер изменения указанных индексов происходил и в холодные изотопные подстадии 5b, 5d, 6.2, 6.4, 6.6. Исходя из этого наблюдения, можно предполагать, что используемые нами индикаторы продуктивности/климата и среды Охотского моря аналогично менялись и во время тысячетлетних осцилляций климата.

На основании высокоточной временной корреляции событий, записанных в ледовых кернах из Гренландии и Антарктиды, было выяснено, что тысячетлетние осцилляции климата в высоких широтах Северного и Южного полушарий происходили в противофазе вследствие так называемого «качельного» эффекта в распределении поступления тепла [Blunier, Brook, 2001]. Во время ИКС 3 (29—59 тыс. к.л.)

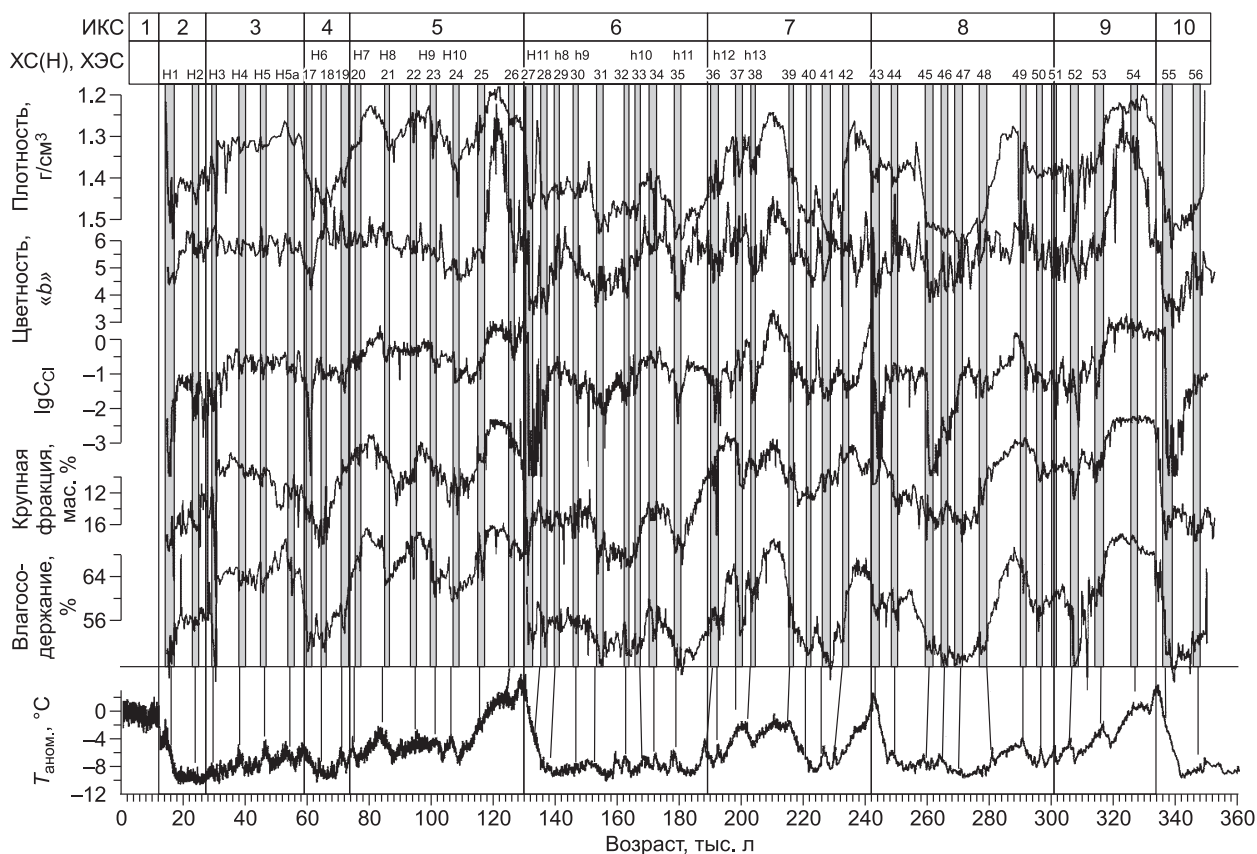


Рис. 2. Записи литофизических характеристик осадков колонки PC-7R во времени в сравнении с аномалиями температур Антарктиды ($T_{\text{аном}}$) [Jouzel et al., 2007].

ИКС — изотопно-кислородные стадии с возрастом границ по [Martinson et al., 1987]. Затененные полосы показывают быстрые похолодания Охотского моря, эквивалентные ХС (ХЭС) H1–H5a [Heinrich, 1988], событиям C17–C56, по номенклатуре [McManus et al., 1994; Jouzel et al., 2007] и событиям h8–h11, по [van Kleveld et al., 1996].

наиболее холодные осцилляции Охотского моря, эквивалентные Хейнрих событиям, происходили синхронно наиболее суровым ДОС Гренландии и более выраженным потеплениям Антарктиды [Blunier, Brook, 2001; Gorbarenko et al., 2007]. Хотя используемая нами возрастная шкала колонки PC-7R не обладает необходимой точностью для корреляции выявленных в Охотском море быстрых осцилляций с тысячелетними изменениями климата Гренландии и Антарктиды, резонно предположить, что выявленный ранее характер осцилляций климата Охотского моря за 80 тыс. к.л. [Frankel et al., 1998] принципиально не менялся за последние 350 тыс. к.л. Тем не менее непрерывная и высокая седиментация изученной колонки позволяет на основании имеющейся временной шкалы обнаружить детальную непрерывную последовательность тысячелетних изменений климата Северного полушария за время ИКС 1–10 и провести их предварительную корреляцию с глобальными изменениями.

Осадки голоцена были несколько нарушены поршневым пробоотборником и практически не рассматривались нами. Скорости седиментации во время ИКС 2 и 3 в данной колонке несколько ниже или равны интенсивности этого параметра в ранее изученной колонке LV 28–40–5 [Малахов и др., 2007б; Gorbarenko et al., 2007], и поэтому в это время выявлены наиболее значительные похолодания и изменения седиментации (ХЭС), коррелируемые с ХС 1–5 и 5a.

Более высокая скорость осадконакопления в исследуемой колонке во время ИКС 4–6 позволяет получить временное разрешение записей с детальностью 170–200 лет и показать наиболее полную последовательность тысячелетних климатических циклов согласно номенклатуре [McManus et al., 1994]. Во время ИКС 4 холодные события C17 (H6), C18 и C19 Охотского моря происходили в примерно в то же время, что похолодания в Северной Атлантике [McManus et al., 1994], ДОС в Гренландии и потепления в Антарктиде. В течение ИКС 5 холодные события Северной Атлантики C20–C25 [Jouzel et al., 2007] и Гренландии [Laj et al., 2000] синхронно выражены и в Охотском море. Событие C25 в ОМ, как и в Северной Атлантике [Jouzel et al., 2007] и Европе [Sirocko et al., 2005], фиксирует конец последнего межледникового и начало последнего оледенения. Холодное событие C26 в начале ИКС 5e аналогично похолоданию

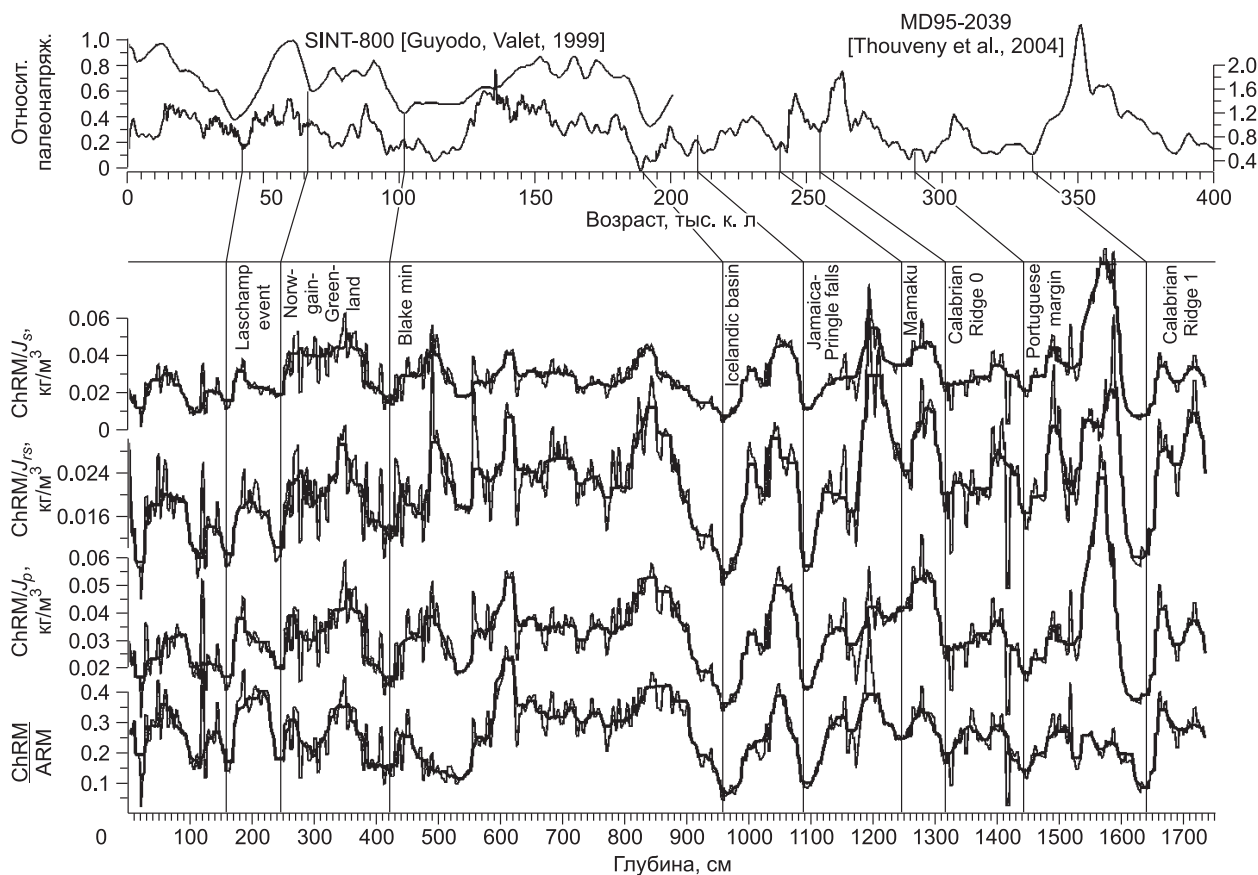


Рис. 3. Корреляция минимумов вариаций относительной палеонапряженности геомагнитного поля в осадках колонки PC-7R (записи по длине колонки) с палеомагнитными событиями датированных кривых относительной палеоинтенсивности из работ [Guyodo, Valet, 1999; Thouveny et al., 2004].

Для исключения зависимости геомагнитного сигнала от климатического фактора сделана нормировка характеристической компоненты намагниченности ChRM изученных осадков: по идеальной намагниченности (ChRM/ARM), парамагнитной компоненте (ChRM/ J_p), намагниченности насыщения за вычетом парамагнитной компоненты (ChRM/ J_s) и остаточной намагниченности насыщения в поле 0.5 Тл (ChRM/ J_{rs}).

(поздний дриас терминации I) после потепления Беллинг/Аллеред. События C20-C24 Охотского моря можно коррелировать с XC 7, 8, 8a, 9 и 10 Северной Атлантики [Heinrich, 1988; Jouzel et al., 2007]. Во время ИКС 6 записи ОМ показывают последовательность похолоданий C27-C35, по терминологии [Jouzel et al., 2007], где наиболее молодое событие C27 хорошо коррелируется с Хейрих событием H11 Атлантики, а C29, C30, C34 и C37 с похолоданиями Атлантики h8-h11 [van Kleveld et al., 1996]. В пределах точности шкалы холодные ХЭС Охотского моря коррелируются с основными быстрыми потеплениями Антарктиды, что подтверждает гипотезу «качелей» механизма передачи быстрых изменений климата Северного и Южного полушарий.

Выявленная в Охотском море за последние 350 тыс. лет последовательность холодных ХЭС с квазипериодичностью 5—8 тыс. к.л. согласуется с периодичностью распада покровных ледников и вариациями содержания солей во льдах Гренландии [Heinrich, 1988; Mayewski et al., 1997]. Вероятно, изменения интенсивности атмосферной циркуляции, которые отражаются вариациями индекса полярной циркуляции [Mayewski et al., 1997], и сдвиги западных струйных течений и муссонной деятельности играют определяющую роль в быстрой изменчивости климата Северного полушария.

Независимый контроль возраста осадков выполнен также на основе схемы корреляции нормированной характеристической намагниченности колонки PC-07R для последних 350 тыс. к.л. [Малахов и др., 2007a,б] с фрагментами кривых относительной палеонапряженности SINT-800 и колонки MD95-2039 [Guyodo, Valet, 1999; Thouveny et al., 2004] (рис. 3). Снижение интенсивности в кривых хода относительной намагниченности ChRM на отдельных участках логично связать с падением напряженности геомагнитного поля при экскурсах [Мёрнер и др., 2001]. Истинные угловые элементы экскурсов магнит-

Контрольные точки возрастной модели колонки PC-7R

Горизонт, см	Границы ИКС, по [Martinson et al., 1987; Bassinot et al., 1994]	Минимумы (эвенты) палеонапряженности	Холодное событие	Прослой тефры	Возраст, тыс. лет	Источник
47	LGM/(B/A)	—	—	—	14.7	—
112	3.0	—	—	—	28	—
119	—	—	—	K_2	30.46	[Gorbarenko et al., 2002]
124	—	—	—	K_2	30.48	»
160	—	Laschamp event	—	—	42	[Thouveny et al., 2004]
212	4.0	—	—	—	58.96	[Martinson et al., 1987]
245	—	Norwegian-Greenland	—	—	65	[Laj et al., 2000]
285	5.0	—	—	—	73.91	[Martinson et al., 1987]
422	—	Blake min	—	—	101.5	[Guyodo, Valet, 1999]
484	—	—	C25	—	117	[Lehman et al., 2002; Sirocko et al., 2005]
595	6.0	—	—	—	129.8	[Martinson et al., 1987]
954	7.0	—	—	—	189.61	»
957	—	Icelandic basin	—	—	190	[Thouveny et al., 2004]
1017—1024	—	—	—	MR_2 (AL 7.2)	~201	[Nuernberg, Tiedermann, 2004]
1085	—	Jamaica-Pringle falls	—	—	210	[Thouveny et al., 2004]
1245	—	Mamaku	—	—	240	»
1255	8.0	—	—	—	242	[Dansgaard et al., 1993]
1315	—	Calabrian Ridge 0	—	—	255	[Thouveny et al., 2004]
1443	—	Portuguese margin	—	—	290	»
1485	9.0	—	—	—	301	[Dansgaard et al., 1993]
1514—1520	—	—	—	MR_3 (AL 9.22)	~310	[Nuernberg, Tiedermann, 2004]
1640	—	Calabrian Ridge 1	—	—	333	[Thouveny et al., 2004]
1645	10.0	—	—	—	334	[Dansgaard et al., 1993]

ного поля Земли могли не записаться из-за сглаживания палеомагнитного сигнала в верхнем активном слое [Малахов, Малахова, 2007].

Сходимость результатов определения возраста отдельных горизонтов по литофизическим характеристикам и палеомагнитным данным очень высокая (таблица), что позволяет авторам сделать объективный вывод — формирование осадков нижней части колонки PC-7R началось во время десятой изотопно-кислородной стадии, и накопление осадочного материала происходило непрерывно по настоящее время.

Происхождение и магнитное состояние железистых минералов теплых и холодных климатических периодов. Типичные кривые магнитного гистерезиса для образцов из двух групп представлены на рис. 4. Поле насыщения нормального остаточного намагничивания не превышает 100—120 мТл. Это характерно для магнитомягких железосодержащих минералов, таких как магнетит и магнитный сульфид железа (грейгит). По линейному участку диапазона до 1.5 Тл однозначно определяются в полной индуцированной намагничен-

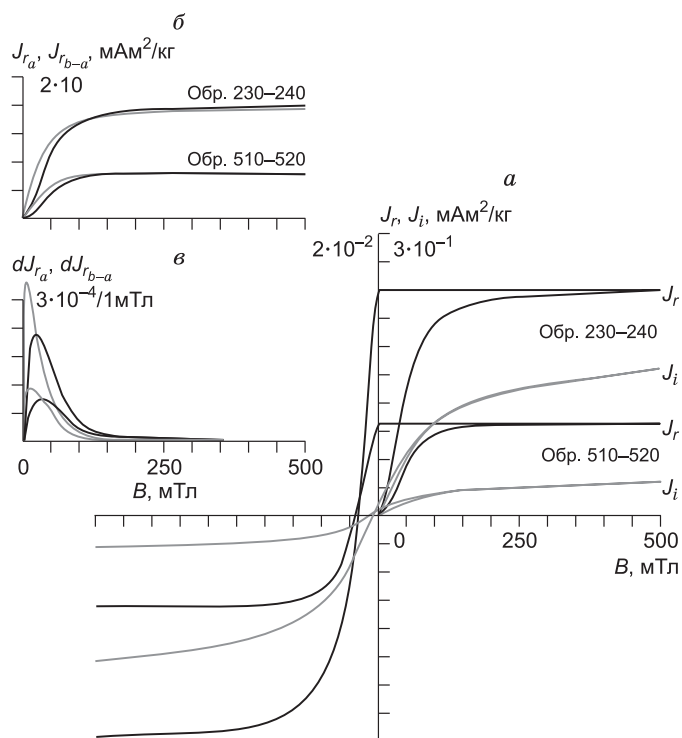


Рис. 4. Кривые магнитного гистерезиса для образцов, образовавшихся в теплый (обр. 510-520) и холодный (обр. 230-240) климатические периоды.

a — зависимости остаточной и индуцированной намагниченностей от величины магнитного поля; *б* — кривые нормального намагничивания по осям *a* и *б* диаграммы Прейзаха—Нееля, *в* — соответствующие им коэрцитивные спектры.

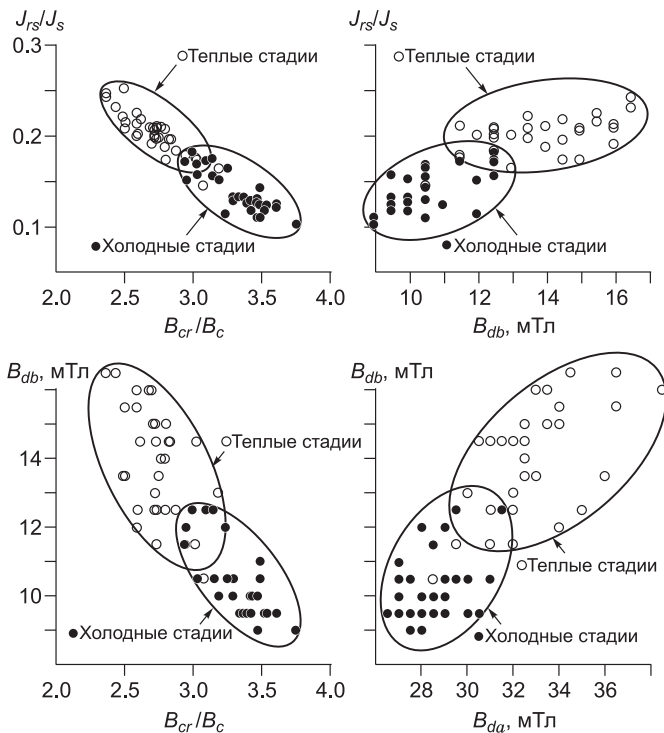


Рис. 5. Диаграммы параметров магнитного гистерезиса образцов, образовавшихся в теплые и холодные климатические периоды.

ности $J_i(B)$ доли намагниченности насыщения $J_s(B)$ ферромагнитных зерен и парамагнитной намагниченности $J_p(B)$ глинистой фракции. На рис. 4, б, в приводятся кривые нормального намагничивания по осям a и b диаграммы Прейзаха—Нееля и соответствующие коэрцитивные спектры [Шолпо, 1977]. По параметрам магнитного гистерезиса построены диаграмма Дея и подобные ей диаграммы, по которым выполняется диагностика доменной структуры частиц и оцениваются их размеры (рис. 5) [Enkin et al., 2007]. Магнитожесть образцов I группы выше, чем образцов II группы, тем не менее на представленных диаграммах магнитного состояния наблюдаются области соприкосновения (пересечения) множеств, принадлежащих образцам соответствующих групп. Этот результат следовало

ожидать, так как в действие основных трендов климатического механизма могли быть внесены шумы стохастической направленности. Занимаемое местоположение двух множеств точек на указанных диаграммах показывает, что образцы I группы содержат преимущественно однодоменную и псевдооднодоменную фракцию ферромагнетика. Магнитные частицы осадков II группы крупнее, доминантой являются многодоменные зерна.

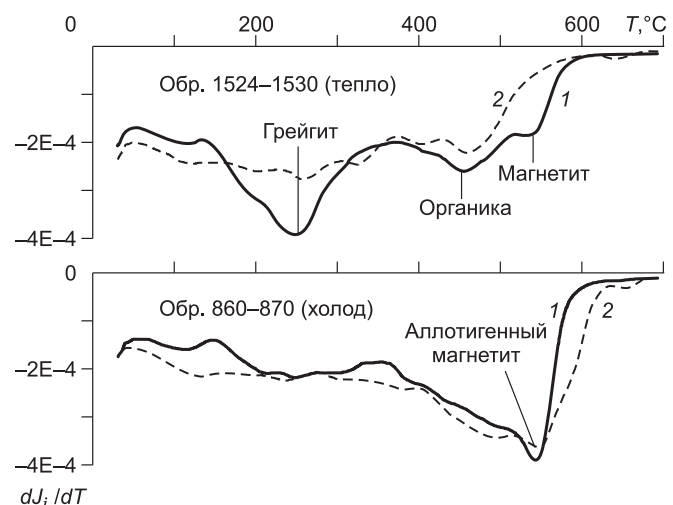
Образцы I группы характеризуются более сложными кривыми дифференциального термомангнитного анализа (ДТМА) [Буров, Ясонов, 1979]. Например, наблюдаются более резкие пики в области температур 230—280 и 450—470 °С (рис. 6). Первый пик характеризует наличие в образцах магнитных сульфидов (грейгит, пирротин). Второй пик обусловлен наличием в осадках органики [Буров и др., 1986]. У образцов II группы спектр блокирующих температур более явно выражен в высокотемпературной области — в интервале 550—580 °С. Такое поведение кривых ДТМА соответствует крупной магнетитовой фракции обломочного характера.

Таким образом, в первом приближении магнитный сигнал в донных осадках формируется двумя типами магнитных фракций и/или их смесей. Данные магнитогеохимического анализа позволяют сделать вывод о происхождении указанных фракций и использовать вариации их концентрации для реконструкции изменений условий окружающей среды.

Авторы полагают, что магнитная фракция образцов I группы представлена смесью однодоменных и псевдооднодоменных частиц с параметрами гистерезиса, тяготеющими к однодоменной области [Nourgaliev et al., 2005]. Присутствие в одних и тех же образцах зерен магнетита (и магнитного сульфида) с магнитным состоянием, близким к однодоменному, может быть только в случае их аутигенного (биогенного) происхождения. Известно, что одни и те же магнитотактические бактерии при смене обстановки (парциального давления серы или кислорода) могут производить однодоменный магнетит или грейгит [Frankel et al., 1998]. Псевдооднодоменный магнетит имеет терригенное происхождение.

Рис. 6. Дифференциальные кривые термомангнитного анализа образцов теплых и холодных стадий.

1 — первый нагрев, 2 — второй нагрев.



Магнитная фракция II группы образцов имеет в основном аллотигенную природу. Она хуже «отсортирована», так как в ней, наряду с мелкими псевдооднородными зернами, присутствуют и крупные многодоменные частицы магнетита (с небольшой примесью титана) ледового разноса [Горбаренко и др., 2003]. Изменение трендов парамагнитной компоненты J_p осадков может быть обусловлено изменением относительного содержания глинистых минералов в отложениях. Этот факт может быть использован для оценки доли терригенной компоненты (параллельно с происхождением крупной ферромагнитной фракцией обломочных зерен), которая отражает интенсивность ледового разноса и холодного климата.

Преобладание аллотигенного (ледового разноса как доминирующего) осадочного материала в холодные климатические стадии и аутигенного (биогенного — как конкурирующего с терригенным) — в теплые свидетельствует о быстрых изменениях среды и процессов седиментации в Охотском море вслед за вариациями климата региона.

ОБСУЖДЕНИЕ

Из приведенных данных вырисовывается модель климатического влияния на процессы седиментогенеза через формирование отличительных черт магнитной фракции донных осадков, образовавшихся в теплые и холодные климатические периоды.

В теплых условиях при высокой палеобиопродуктивности бассейна Охотского моря формировались осадки, магнетик которых представлял частицы в основном с однодоменной структурой. Можно предполагать наличие в таких осадках остатков магнитотактических бактерий [Moskowitz et al., 1993; Egli, 2004]. Они могут существовать в бассейне только в том случае, если в течение срока высокой биопродуктивности на дне накапливался достаточный объем органического материала, необходимого для

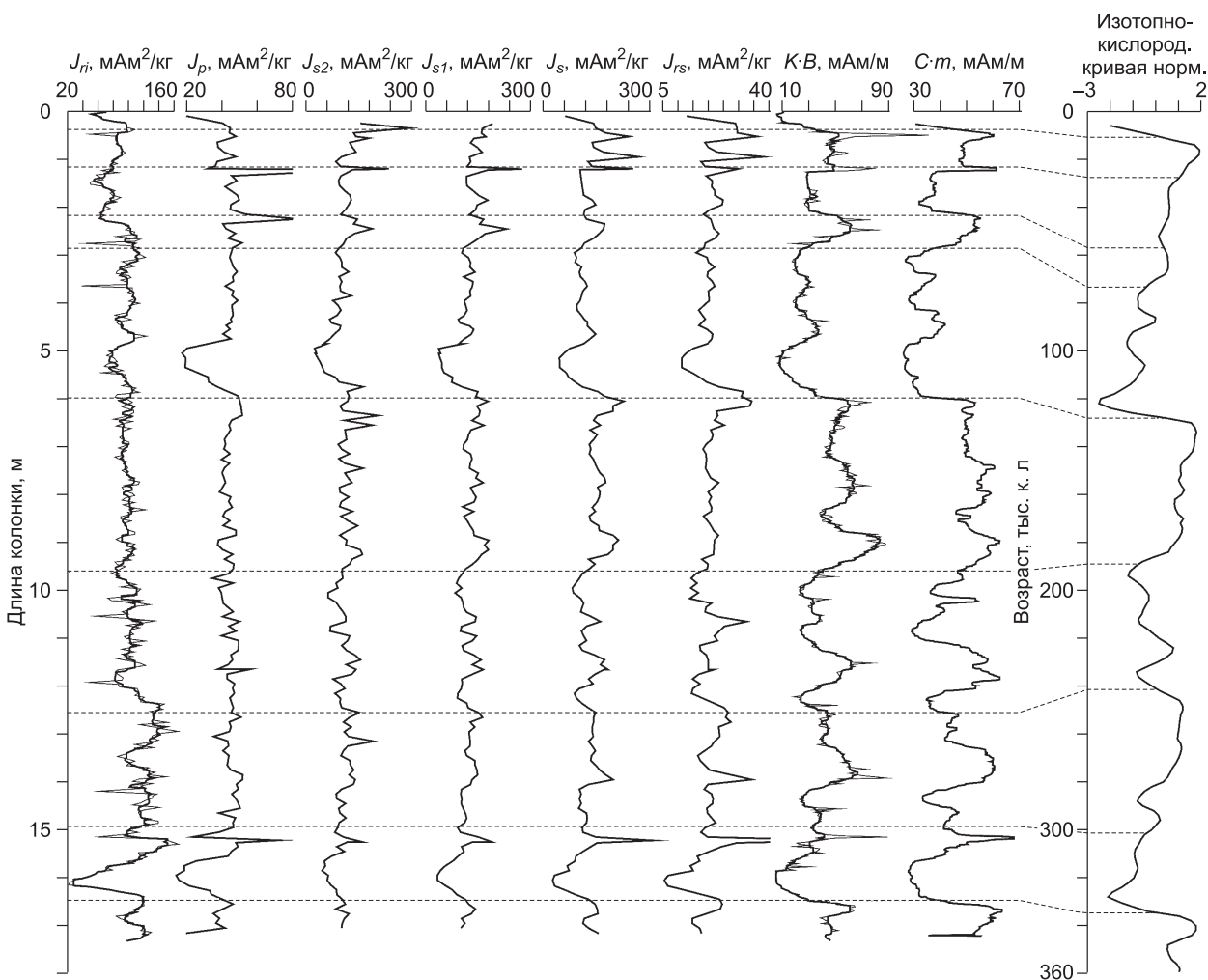


Рис. 7. Корреляция кривых хода различных климатозависимых петромагнитных параметров колонки PC-7R со стандартной изотопно-кислородной кривой.

Пунктиром показаны границы изотопно-кислородных стадий (см. таблицу).

того, чтобы граница окислительной и восстановительной зон (ОВЗ) находилась в толще воды. Это является условием для существования магнитотактических бактерий, формирующих внутри себя однодоменные кристаллы так называемого биологически контролируемого магнетита [Spring, Bazylinski, 2003].

В холодные сезоны основу магнитной фракции составлял аллотигенный магнетит ледового разнота (обломки изверженных и метаморфических пород). При подавленной биопродуктивности слой органического материала, по-видимому, очень мал и условия для существования магнитотактических бактерий практически отсутствуют. Так как граница окислительной и восстановительной зон в этом случае находится в осадке, то бактериям нет надобности ориентироваться в пространстве для перехода из восстановительной зоны на границу ОВЗ. В этом случае в осадках может формироваться в малых количествах по сравнению с терригенным магнетитом так называемый биологически индуцированный магнетит, соответствующий суперпарамагнитному состоянию [Spring, Bazylinski, 2003].

Синхронное поведение кривых петромагнитных сигналов и стандартной изотопно-кислородной кривой позволяет сделать вывод об отсутствии резких изменений соотношения аллотигенного и аутигенного (биогенного) магнитного материала в отложениях колонки PC-7R (рис. 7). Осадки Охотского моря надежно фиксировали два основных климатических механизма, которые циклически сменяли друг друга за последние 350 тыс. лет. Это периоды с относительно высокой биопродуктивностью, «комфортными» условиями развития магнитотактических бактерий и холодные периоды с пониженной биопродуктив-

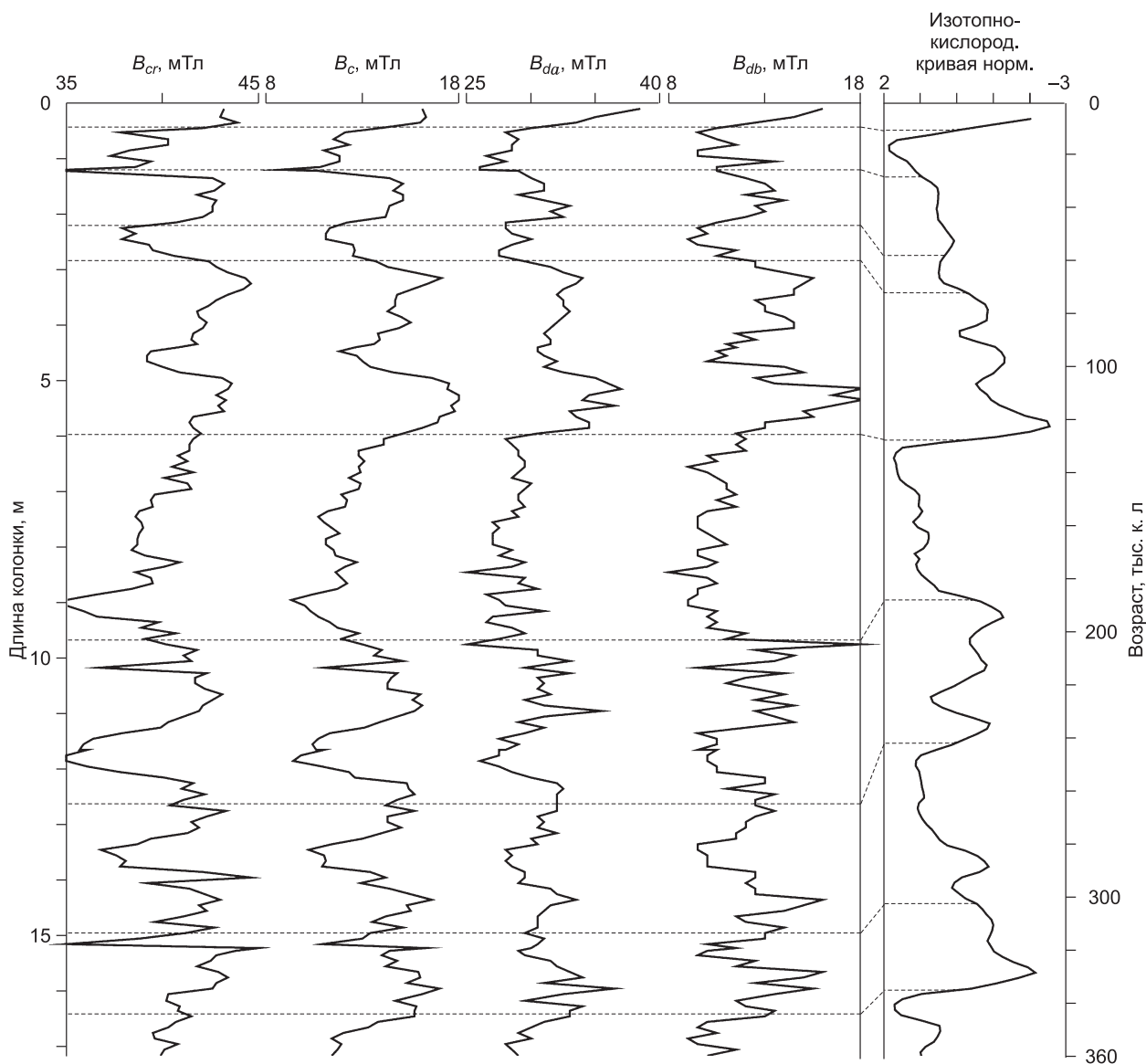


Рис. 8. Корреляция кривых хода параметров магнитного гистерезиса колонки PC-7R со стандартной изотопно-кислородной кривой.

Пунктиром показаны границы изотопно-кислородных стадий (см. таблицу).

ностью, большой площадью покрытия льдом поверхности моря, доминирующим развитием процесса ледового разноса терригенного материала [Горбаренко и др., 2003]. Петромагнитные сигналы (см. рис. 7) показывают синхронные вариации концентрации магнитного вещества в зависимости от колебаний климата. Два «качественных» состояния магнитной фракции (тепло, холод) отмечает также доменная структура (гранулометрия) частиц (см. рис. 5). Влияние изменения климата за последние 350 тыс. к.л. на вариации параметров магнитного гистерезиса осадков представлено на рис. 8. Следует отметить, что форма сигналов повторяет зеркальное отображение сигнала, описывающего изменение общей концентрации магнетика в осадках (см. рис. 7).

Другие литологические признаки (последовательность пепловых прослоев, отсутствие перерывов) также свидетельствуют о классическом характере седиментации и отсутствии катастрофических событий поступления терригенного материала [Gorbarenko et al., 2002, 2007].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате петромагнитного исследования керна осадков из центральной части Охотского моря, обеспеченных предварительной возрастной шкалой, было определено, что при колебаниях климатических условий синхронно изменялись *концентрация* и *гранулометрия* магнитных частиц.

В теплые периоды концентрация крупных магнитных частиц уменьшалась из-за снижения действия механизма ледового разноса терригенной фракции, но деятельность магнитотактических бактерий не могла заместить снижение поставки терригенного магнетита значительно мелким биогенным. При холодном климате биопродуктивность существенно подавлялась, петромагнитные характеристики осадков отмечали увеличение концентрации главным образом терригенного крупного магнетита.

Во время теплых изотопно-кислородных стадий и подстадий в осадках, наряду с псевдооднодоменным аллотигенным магнетитом, присутствовали однодоменные зерна магнетита и магнитного сульфида (грейгита, пирротина). В холодные периоды накапливались отложения, содержащие смесь псевдооднодоменного и многодоменного обломочного магнетита. Причем форма сигналов, сформированных параметрами доменной структуры, зеркально повторяет сигнал, показывающий изменения общей концентрации магнетика в осадках за последние 350 тыс. лет.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 07-05-00655а, 09-05-01128а), программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН № 7 и гранта ДВО РАН (09-И-СО-07-003).

ЛИТЕРАТУРА

Буров Б.В., Ясонов П.Г. Введение в дифференциальный термомагнитный анализ горных пород. Казань, Изд-во Казан. ун-та, 1979, 168 с.

Буров Б.В., Нурғалиев Д.К., Ясонов П.Г. Палеомагнитный анализ. Казань, Изд-во Казан. ун-та, 1986, 167 с.

Горбаренко С.А., Лесков В.Ю., Артемова А.В., Тидеман Р., Бибоу Н., Нюрнберг Д. Ледовый покров Охотского моря во время последнего оледенения и голоцена // Докл. РАН, 2003, т. 388, № 5, с. 678—682.

Горбаренко С.А., Малахов М.И., Гольдберг Е.Л., Захарков С.П., Босин А.А., Василенко Ю.П. Орбитальные и тысячелетние изменения климата и среды дальневосточных морей в позднем плейстоцене и голоцене // Геология морей и океанов. Т. 1. М., ГЕОС, 2007, с. 200—202.

Горбаренко С.А., Харада Н., Малахов М.И., Василенко Ю.П., Босин А.А., Гольдберг Е.Л. Тысячелетние осцилляции климата и среды Охотского моря за последние 190 тысяч лет в связи с глобальными изменениями // Докл. РАН, 2008, т. 423, № 3, с. 389—392.

Захарков С.П., Босин А.А., Горбаренко С.А. Содержание хлорина в морских осадках как индикатор палеопродуктивности // Вестн. ДВО РАН, 2007, № 1, с. 52—58.

Малахов М.И. Отбор ориентированных образцов глубоководных донных образований на палеомагнитный анализ. Магадан, СВКНИИ ДВО АН СССР, 1989, 13 с.

Малахов М.И., Малахова Г.Ю. Магнитореологическая модель литогенетических структур пелагической области Тихого океана. Реология зоны Такера-Храмова // Физика Земли, 2007, № 11, с. 66—80.

Малахов М.И., Горбаренко С.А., Малахова Г.Ю., Соляников Я.Л., Маслов И.Н., Василенко Ю.П., Босин А.А. Изменения климата и напряженности геомагнитного поля на шкале тысячелетий (по данным изучения позднеплейстоцен-голоценовых отложений центральной части Охотского моря) // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент. М., ГЕОС, 2007а, с. 80—86.

Малахов М.И., Горбаренко С.А., Малахова Г.Ю., Соляников Я.Л., Василенко Ю.П., Босин А.А. Влияние климатических факторов и напряженности геомагнитного поля на остаточную намагниченность морских донных отложений // Вестн. СВНЦ ДВО РАН, 2007б, № 4, с. 14—30.

Матасова Г.Г., Казанский А.Ю., Зыкина В.С. Наложение «аляскинской» и «китайской» моделей записи палеоклимата в магнитных свойствах отложений верхнего и среднего плейстоцена на юге Западной Сибири // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (7), с. 638—651.

Мернер Н.-А., Петрова Г.Н., Пилипенко О.В., Распопов О.М., Трубихин В.М. Появление экскурсов на фоне изменения магнитного момента Земли // Физика Земли, 2001, № 10, с. 24—32.

Печерский Д.М. Петромагнетизм и палеомагнетизм. Справочное пособие для специалистов из смежных областей науки. М., Наука, 1985, 125 с. <http://paleomag.ifz.ru>

Шолпо Л.Е. Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач. Л., Недра, 1977, 182 с.

Bassinot F., Labeyrie L., Vincent E., Quidelleur X., Shackleton N.J., Lancelot Y. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal // Earth Planet. Sci. Lett., 1994, v. 126, p. 91—108.

Blunier T., Brook E.J. Timing of millennial-scale climate change in Antarctica and Greenland during the last glacial period // Science, 2001, v. 291, p. 109—112.

Dansgaard W., Johnsen S.J., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Gundestrup N.S., Hammer C.U., Hvidberg C.S., Steffensen J.P., Sveinbjörnsdóttir A.E., Jouzel J., Bond G. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record // Nature, 1993, v. 364, p. 218—220.

Egli R. Characterization of individual rock magnetic components by analyzing remanence curves // Phys. Chem. Earth, 2004, v. 29, p. 869—884.

Enkin R.J., Baker J., Nourgaliev D., Iassonov P., Hamilton T.S. Magnetic hysteresis parameters and Day plot analysis to characterize diagenetic alteration in gas hydrate-bearing sediments // J. Geophys. Res., 2007, v. 112, B06S90, doi: 10.1029/2006JB004638.

Frankel R.B., Zhang J.-P., Bazylinski D.A. Single magnetic domains in magnetotactic bacteria // J. Geophys. Res., 1998, v. 103, p. 30 601—30 604.

Gorbarenko S.A., Nürnberg D., Derkachev A.N., Astakhov A.S., Southon J.R., Kaiser A. Magnetostratigraphy and tephrochronology of the upper Quaternary sediments in the Okhotsk Sea: implication of terrigenous, volcanogenic and biogenic matter supply // Mar. Geol., 2002, v. 183, p. 107—129.

Gorbarenko S.A., Goldberg E.L., Kashgarian M., Velivetskaya N.S., Zakharkov S.P., Pechnikov V. C., Bosin A.A., Psheneva O.Yu., Ivanova E.D. Millennium scale environment changes of Okhotsk Sea during last 80 kyr and their phase relationship with global climate changes // J. Oceanography, 2007, v. 63, p. 609—623.

Guyodo Y., Valet J.-P. Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr // Nature, 1999, v. 399, p. 249—252.

Harris P. G., Zhao M., Rosell-Mele A., Tiedemann R., Sarnthein M., Maxell J.R. Chlorine accumulation rate as a proxy for Quaternary marine primary productivity // Nature, 1996, v. 383, p. 63—66.

Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafted in the Northeast Atlantic ocean during the past 130 000 years // Quatern. Res., 1988, v. 29, p. 142—152.

Iassonov P.G., Nourgaliev D.K., Burov B.V., Heller F.A. A modernized coercivity spectrometer // Geologica Carpathica, 1998, v. 49, p. 224—225.

Jouzel J., Masson-Delmotte V., Cattani O., Falourd S., Stievenard M., Stenni B. Orbital and millennial Antarctic climate over the past 800 000 years // Science, 2007, v. 317, p. 793—796.

van Kleveld S.A., Knappertsbusch M., Ottens J., Ganssen G.M., van Hinte J.T. Biogenic carbonate and ice rafted debris (Heinrich layer) accumulation in deep-sea sediments from a Northeast Atlantic piston core // Mar. Geol., 1996, v. 131, p. 21—46.

Laj C., Kissel C., Mazaud A., Channell J.E.T., Bee J. North Atlantic paleointensity stack since 75 ka (NAPIS-75) and duration of the Laschamp event // Phil. Trans. R. Soc. Lond., 2000, v. 358 A, p. 1009—1025.

Landais A., Masson-Delmotte V., Jouzel J., Raynaud D., Johnsen S., Huber C., Leuenberger M., Schwander J., Minster B. The glacial inception as recorded in the North GRIP Greenland ice core: timing, structure and associated abrupt temperature changes // Climate Dynamics, 2006, v. 26, p. 273—284.

Lehman S.J., Sachs J.P., Rotwell A.M., Keigwin L.D., Boyle E.A. Relation of subtropical Atlantic temperature, high-latitude ice rafting, deep water formation, and European climate 130,000—60,000 years ago // Quatern. Sci. Rev., 2002, v. 21, p. 1917—1924.

Martinson D.G., Pisias N.G., Hays J.D., Imbrie J., Moore T.C., Shackleton N.J. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300 000-year chronostratigraphy // Quatern. Res., 1987, v. 27, p. 1—29.

Mayewski P.A., Meeker L.D., Twicker M.S., Whitlow S.I., Yang O., Lyons W.B., Prentice M. Major features and forcing of high latitude northern hemisphere atmospheric circulation over the last 110 000 years // J. Geophys. Res., 1997, v. 102, p. 26 345—26 366.

McManus J.F., Bond G.C., Broecker W.S., Johnsen S., Labeyrie L., Higgins S. High-resolution climate records from the North Atlantic during the last interglacial // *Nature*, 1994, v. 371, p. 326—329.

Moskowitz B.M., Richard B., Frankel R., Bazylnski D.A. Rock magnetic criteria for the detection of biogenic magnetite // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, v. 120, p. 283—300.

Nourgaliev D.K., Iasonov P.G., Kosareva L.R., Khassanov D.I., Kazansky A.Yu., Fedotov A.P. The origin of magnetic minerals in the Lake Khubsugul sediments (Mongolia) // *Russian J. Earth Sci.*, 2005, v. 7, № 3, p. 1—6.

Nürnberg D., Tiedermann R. Environmental change in the Sea of Okhotsk during the last 1.1 million years // *Paleoceanography*, 2004, v. 19, PA4011, doi: 10.1029/2004 PA001023.

Sirocko F., Seelos K., Schaber K., Rein B., Dreher F., Diehl M., Lenne R., Jäger K., Krbetscher M. A last Eemian aridity pulse in central Europe during the last glacial inception // *Nature*, 2005, v. 436, p. 833—836.

Spring S., Bazylnski D. Magnetotactic bacteria / Ed. M. Dworkin // *The prokaryotes: an evolving electronic resource for microbiological community* / New York, Springer-Verlag, 2003, p. 4—39.

Thouveny N., Carcaillet J., Moreno E., Leduc G., Neirini D. Geomagnetic moment variation and paleomagnetic excursions since 400 kyr BP: a stacked record from sedimentary sequences of the Portuguese margin // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, v. 219, p. 377—396.

*Рекомендована к печати 29 апреля 2009 г.
Н.Л. Добрецовым*

*Поступила в редакцию 2 октября 2008 г.,
после доработки — 13 апреля 2009 г.*