

## ЗАПИСЬ ПОВЕДЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОСАДКАХ ОЗЕРА БАЙКАЛ (СКВ. ВDP-99)

М.А. Крайнов, А.Ю. Песков\*, А.В. Косынкин\*, М.И. Кузьмин

*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия*

*\* Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 680063, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, Россия*

Проведено исследование относительной палеонапряженности осадочных отложений, полученных в ходе глубоководного бурения на оз. Байкал (скв. ВDP-99). Исследованы два интервала: 0—420 тыс. лет (эпоха Брюнес) и 1.05—1.09 млн лет (до, во время и после инверсии Матуяма—Харамильо). Для этих же интервалов построены кривые идеальной намагниченности образцов.

Анализ поведения величины палеонапряженности по разрезу скважины позволил нам выделить 4 экскурса, записанных в байкальских осадках, выделение которых на зависимости наклонение—глубина было затруднено.

Для нижней части разреза — интервал субзон Матуяма—Харамильо получены данные о падении значений палеонапряженности в 5 раз и более относительно значений палеонапряженности в интервале с постоянной полярностью.

*Четвертичные осадочные отложения, палеомагнетизм, палеонапряженность, Байкал.*

## A RECORD OF THE BEHAVIOR OF THE GEOMAGNETIC FIELD IN THE SEDIMENTS OF LAKE BAIKAL (evidence from the BDP-99 borehole)

M.A. Krainov, A.Yu. Peskov, A.V. Kosynkin, and M.I. Kuz'min

The relative paleointensity of sedimentation is studied for sediments stripped by deep-water drilling in Lake Baikal (BDP-99 borehole). Two intervals are considered: 0–420 ka (Brunhes chron) and 1.05–1.09 Ma (before, during, and after the Matuyama–Jaramillo reversal). For these intervals, curves of the ideal magnetization of samples are plotted.

The paleointensity data obtained along the borehole section reveal four excursions for the Baikal sediments whose identification on the inclination—depth curve is complicated.

The lower part of the section (Matuyama–Jaramillo subzones) shows a paleointensity decrease by a factor of five or more relative to periods of invariable polarity.

*Quaternary sediments, paleomagnetism, paleointensity, Baikal*

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия интерес к палеомагнитному (магнитостратиграфическому) изучению молодых озерных отложений существенно вырос по ряду причин, основными из которых являются следующие: 1) консервативный режим осадконакопления во многих озерных системах на протяжении позднего кайнозоя позволяет получать хорошо разрешимые и интерпретируемые записи вариаций геомагнитного поля; 2) некоторые вариации (десяtkи тысяч лет) геомагнитного поля хорошо коррелируются с климатическими, так как причиной тех и других являются изменения орбитальных параметров вращения Земли [Петрова, 1998; Большаков, 1999; Поспелова, 2000, 2002].

Особое место в изучении вариаций древнего геомагнитного поля занимает его палеонапряженность, которая характеризует абсолютный магнитный момент Земли в различные геисторические эпохи. Обоснование вероятной связи между изменением магнитного момента Земли и климатическими колебаниями занимает многих исследователей [Петрова и др., 1999].

Основной задачей настоящей работы является получение записи относительной палеонапряженности по четвертичным осадкам оз. Байкал. Благодаря существованию синтетической шкалы палеонапряженности для последних полутора миллионов лет [Channell et al., 2009], полученные данные предполагалось рассматривать как независимый инструмент для проведения корреляций и датирования осадочных разрезов оз. Байкал. Кроме того, палеонапряженность позволяет осуществить более достоверное выделение экскурсов, нежели использование только сведений о наклонении.

В ходе исследования палеонапряженности также была получена детальная кривая идеальной намагниченности (ARM), что для данного разреза было сделано впервые. Данные по ARM дают еще один способ изучить изменение осадка на различных горизонтах и органично дополняют полученные ранее авторами сведения о магнитной восприимчивости.

### РАЙОН РАБОТ И КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КЕРНА СКВАЖИНЫ

В 1999 г. в рамках проекта «Бурение на Байкале и Хубсугуле» была пробурена скв. BDP-99, которая расположена на северо-западном склоне Посольской банки в зоне выноса осадочного материала крупнейшим притоком озера — р. Селенга (рис. 1). Причиной выбора данной точки бурения стали выровненный рельеф, отсутствие несогласий на сейсмических записях, указывающее на непрерывное осадконакопление, а также высокая скорость седиментации, позволяющая получить высокое временное разрешение.

В ходе бурения скважины были получены два ствола до глубин 113 и 251.9 м. Выход керна составил 98 %. Во втором стволе скважины до глубины 350.5 м было испытано новое керноприемное устройство, давшее выход керна 55 %.

Литологические исследования керна показали, что в разрезе выделяются три толщи: 0—120, 120—230 и 230—325 м.

Нижняя толща сложена алевритистыми глинами с примесью песчаного материала. В ней часто встречаются прослойки более грубого материала (до 20 % объема осадков). Диатомовые илы глубже 272 м практически отсутствуют.

Средняя толща также представлена алевритистыми глинами, но в ней значительно ниже примесь грубого материала, в то время как створки диатомовых могут занимать до 10—15 % объема осадка.

Верхняя толща биогенно-терригенных илов характеризуется непостоянным составом терригенного материала и значительными вариациями песчано-алевритистой фракции. Характерным является ритмичность в распределении створок диатомовых. На горизонтах, где осадки накапливались в теплый период времени, диатомовые составляют 20—40 % объема осадка, в то время как на других падают до нулевых значений, а осадочный материал представлен глинами [Коллектив..., 1995, 2004; BDP..., 2005].

За прошедшие годы были проведены разнообразные исследования керна скв. BDP-99 [Коллектив..., 2004; BDP-99..., 2005]. В том числе на основе изучения биогенного кремнезема, величины магнитной восприимчивости, наклона магнитного поля, изменения видового состава диатомовых водорослей были построены хорошо коррелируемые возрастные модели. Данные этих исследований использованы для уточнения палеоклиматической модели региона оз. Байкал для второй половины четвертичного периода [Khursevich et al., 2005]. Таким образом, к началу настоящей работы в распоряжении авторов имелся большой массив экспериментальных данных и результатов, их интерпретации, что позволило провести сопоставление построенных моделей, выполнить сравнение с океанической кислородной кривой и установить стадии похолодания/потепления.

Оценка скорости осадконакопления принимается на основе локальных диатомовых зон (ЛДАЗ), по [Khursevich et al., 2005]. Датировка диатомовых зон проведена по изотопному анализу осадков скв. BDP-96-2 [Хурсевич и др., 2001]. Показано, что установленные зоны распространены по всему Байкалу. Проведенные исследования позволили установить наличие разрыва, т.е. прерывность осадконакопления в скв. BDP-99, что не наблюдалось на сейсмических записях. Скорость осадконакопления выше границы несо-

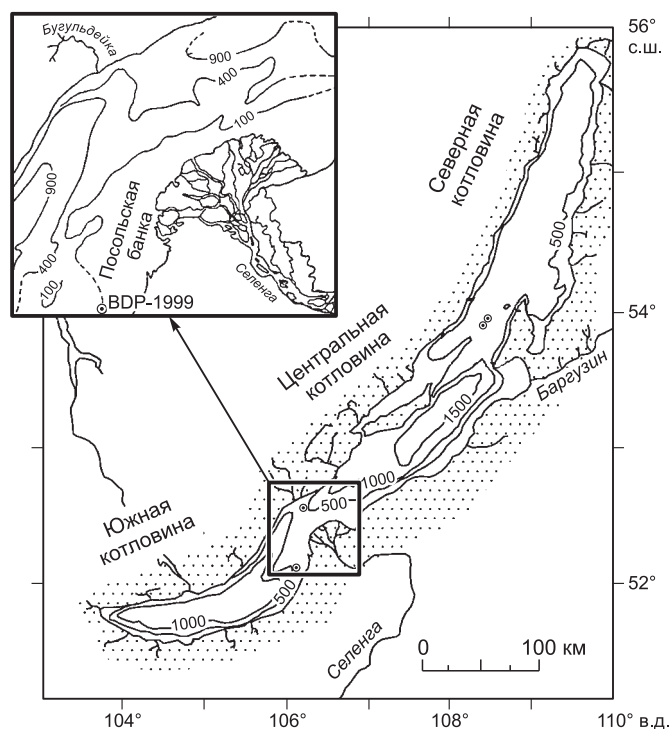


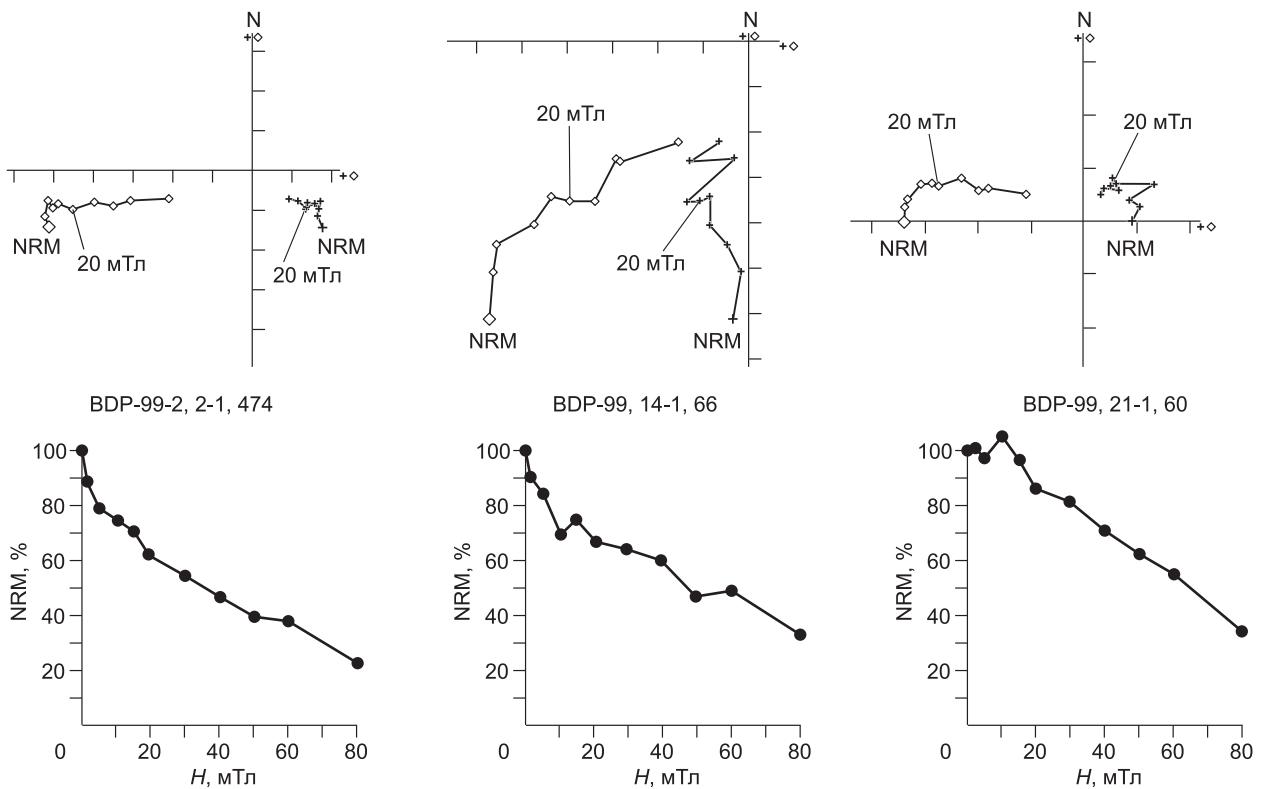
Рис. 1. Карта оз. Байкал с указанием точки бурения скв. BDP-99.

гласия составляет 16.15 см/тыс. лет, а ниже достигает 1.0—1.5 м/тыс. лет [Хурсеви́ч и др., 2001; Khursevich et al., 2005].

### НАКЛОНЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Полученные керны были распилены на части длиной 0.51—1.00 м и с торцов полученных коротких трубок отобраны ориентированные образцы. Для пилотной коллекции (54 образца) проведено детальное ступенчатое размагничивание переменным магнитным полем (2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 и 80 мТл). При этом разрушается до 75 % естественной остаточной намагниченности (рис. 2). У большинства образцов вязкая компонента разрушается в поле амплитудой 2—5 мТл, у остальных до 10 мТл. При дальнейшем размагничивании (от 15 до 80 мТл) направление вектора остаточной намагниченности практически не меняется, что можно увидеть при наложении друг на друга кривых наклоения после воздействия полями 10 и 20 мТл. Поэтому исследование образцов основной части коллекции проведено с шагом 5, 10 и 20 мТл. Результаты измерения остаточной намагниченности у полученных образцов в виде графика наклоения магнитного поля приведены на рис. 3. Первоначально инверсия на глубине 218 м была проинтерпретирована нами как граница Матуяма (C1r.1r)—Брюнес (C1n), так как сейсмический профиль указывал на непрерывность осадконакопления. Дальнейшие исследования диатомовых водорослей показали ошибочность данной интерпретации: их возраст указывал, что данная смена полярности соответствует инверсии Матуяма (C1r.2r)—Харамильо (C1r.1n) [Коллектив..., 2004; BDP-99..., 2005].

Следует обратить внимание на характерную «пилу» в интервале глубин 220—250 м, соответствующем вышеупомянутому переходу Матуяма (C1r.2r)—Харамильо (C1r.1n), когда наклонение неоднократно меняет знак. На этом же уровне (глубина 218 м) обнаружены остатки диатомовых водорослей, которые существовали в Байкале в интервале 1.07—1.12 млн лет [Khursevich et al., 2005]. В то же время различные исследователи сходятся в том, что граница Матуяма—Харамильо находится в интервале 0.97—1.07 млн лет [Opdyke, Channell, 1996]. Сопоставляя эти данные, нами было определено, что запись инверсии Матуяма—Харамильо расположена на глубине 218 м, и ей соответствует возраст 1.07 млн лет. Данный возраст соответствует и принятому по GPTS [Gradstein et al., 2004]. Полученные данные свидетельствуют, что смена полярности продолжалась на протяжении 10 тыс. лет с неоднократной переменной наклоения магнитного поля в течение этого времени (см. рис. 3).



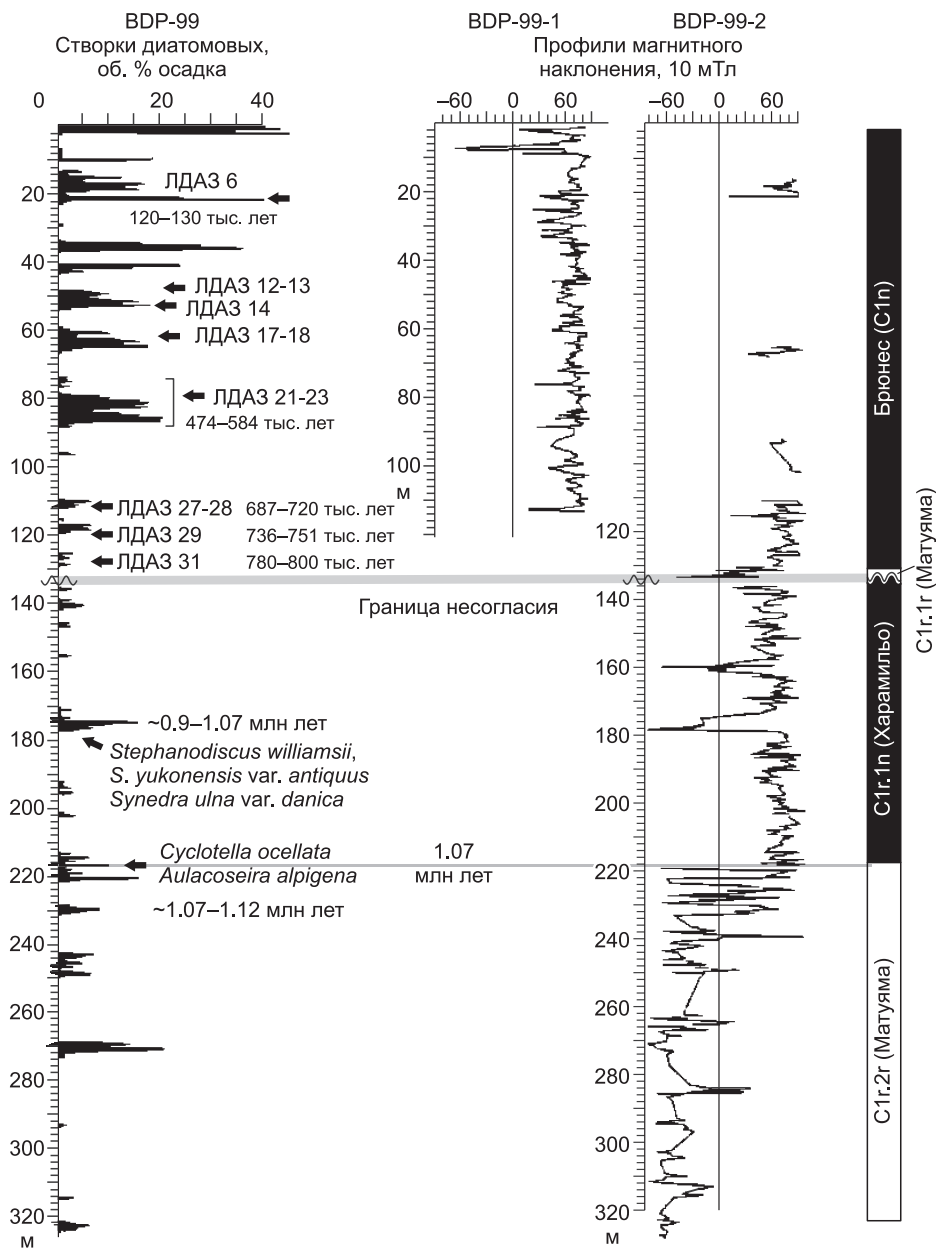
**Рис. 2. Примеры детального размагничивания отдельных образцов.**

Указаны номер скважины, номер керна в скважине и глубина отбора образца в керне (см.).

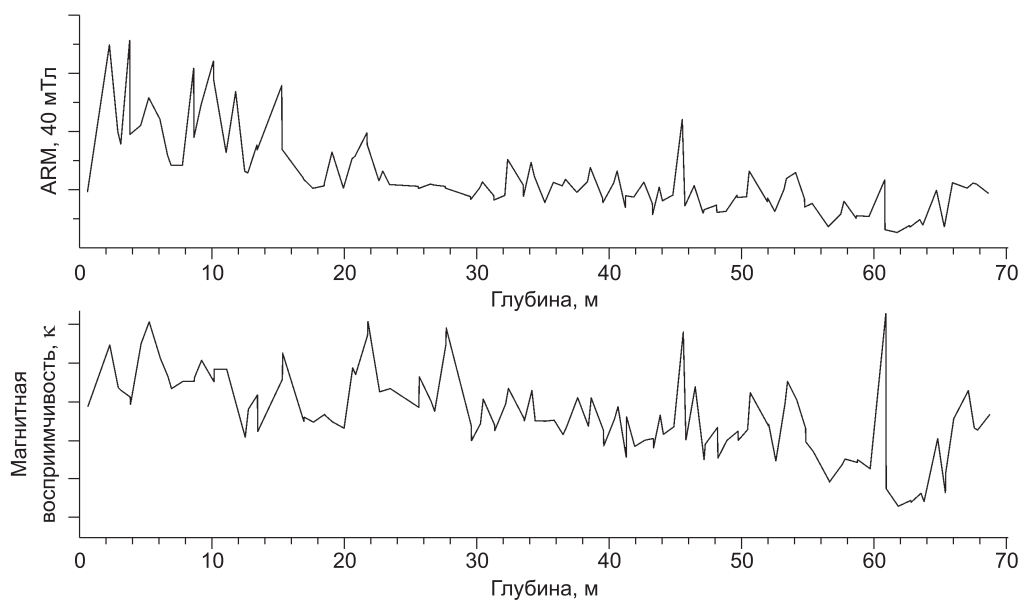
## ПАЛЕОНАПРЯЖЕННОСТЬ

Для изучения палеонапряженности образцы в экранируемом от земного магнитного поля пространстве дополнительно размагничивались переменным магнитным полем 20, 40 и 60 мТл. Измерения остаточной намагниченности проводились с использованием спин-магнитометров JR-4 и JR-6. После каждой ступени размагничивания, при той же величине переменного магнитного поля создавалась ориентированная ARM (идеальная намагниченность). Графики магнитной восприимчивости и идеальной намагниченности в зависимости от глубины разреза приведены на рис. 4 и 5.

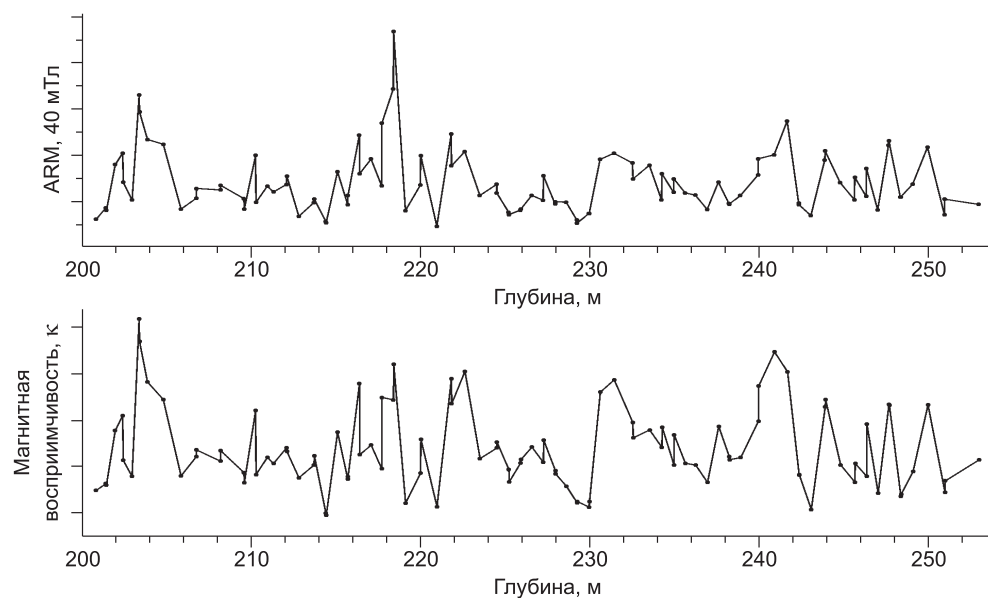
При этом намагниченность не достигала насыщения, что свидетельствует о наличии в образцах высококоэрцитивной компоненты. Относительная величина палеонапряженности рассчитывалась как отношение модуля вектора NRM к модулю вектора ARM. Согласно работам [Петрова, 1998; Печерский, 2006] для оценки относительной палеонапряженности осадков может использоваться отношение величины естественной остаточной намагниченности к идеальной или остаточной намагниченности насыщения. Необходимым условием для оценки относительной палеонапряженности таким способом является однородность коллекции по происхождению и по ансамблю зерен магнитных минералов в разрезе.



**Рис. 3.** Изменение наклоения NRM осадков скв. BDP-99 с глубиной (наст. работа) и сопоставление с данными диатомовой стратиграфии [Khursevich et al., 2005].



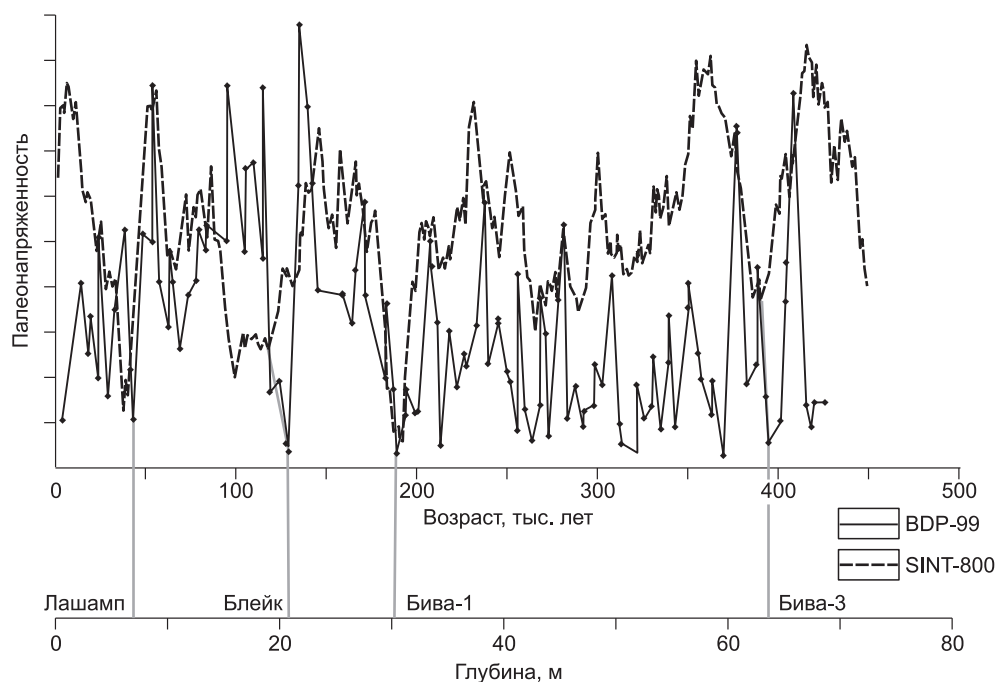
**Рис. 4. Изменение магнитной восприимчивости и идеальной намагниченности в осадках верхней части скв. BDP-99.**



**Рис. 5. Изменение магнитной восприимчивости и идеальной намагниченности в осадках скв. BDP-99 в период инверсии Харамильо—Матугама.**

Результат термомагнитного анализа фракций не позволил прийти к однозначному выводу об однородности распределения магнитных минералов. Чтобы убедиться, что осадочные отложения сохраняют сведения о палеонапряженности, был поставлен следующий эксперимент.

20 образцов, предварительно размагниченных переменным магнитным полем до 100 мТл, что обеспечило снятие 80 % первоначальной намагниченности, были намагничены в современном поле Земли при величине переменного поля 150 мТл, в котором полностью разрушается первичная компонента намагниченности. Затем их еще раз ступенчато размагнитили с детальным шагом (5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80 мТл). Один образец был отбракован из-за механического разрушения, дальнейшие расчеты проведены с 19 образцами.



**Рис. 6.** Изменение палеонапряженности в осадках верхней части скв. BDP-99 в сравнении с мировой синтетической шкалой SINT-800 [Guyodo, Valet, 1999].

Отмечены обнаруженные экскурсы.

В идеале полученная величина палеонапряженности должна была быть одинаковой, поскольку образцы были намагничены в одном и том же современном поле Земли. Для оценки однородности результатов использовался коэффициент вариации, равный отношению среднего квадратичного отклонения к среднему арифметическому и выраженный в процентах. Совокупность считается однородной, если коэффициент вариации не превышает 33 % [Балинова, 2004]. Рассчитанный коэффициент вариации составил 21.9 %, что меньше предельно допустимого в статистике значения 33 %. Это свидетельствует, что выборка является однородной. Таким образом, можно утверждать, что представленные осадочные отложения пригодны для изучения палеонапряженности.

Для контроля полученных значений палеонапряженности, оценка последней была произведена по отношению Кенигсбергера, т.е. по величине характеристической остаточной намагниченности, отнесенной к восприимчивости [Печерский, 2006]. Магнитная восприимчивость была измерена на каппометре KLY-2. Сходимость полученных результатов подтвердила их достоверность (линейный коэффициент корреляции между отношениями остаточной намагниченности к магнитной восприимчивости и к идеальной намагниченности равен  $0.885 \pm 0.068$ ). Полные петли магнитного гистерезиса, а также величина остаточной намагниченности насыщения (SIRM) были измерены у 32 образцов в палеомагнитной лаборатории ИТиГ ДВО РАН (г. Хабаровск) на измерителе гистерезисных параметров\* (ИГП-2, производства ГО «Борок»). Образцы были отобраны с различных горизонтов (до, во время и после инверсии). Коэффициент корреляции между нормировкой по ARM и нормировкой по SIRM составил  $0.820 \pm 0.084$ . Таким образом, можно утверждать, что независимо от выбранного нами способа нормировки, результаты показывают высокую сходимость и их можно использовать для интерпретации.

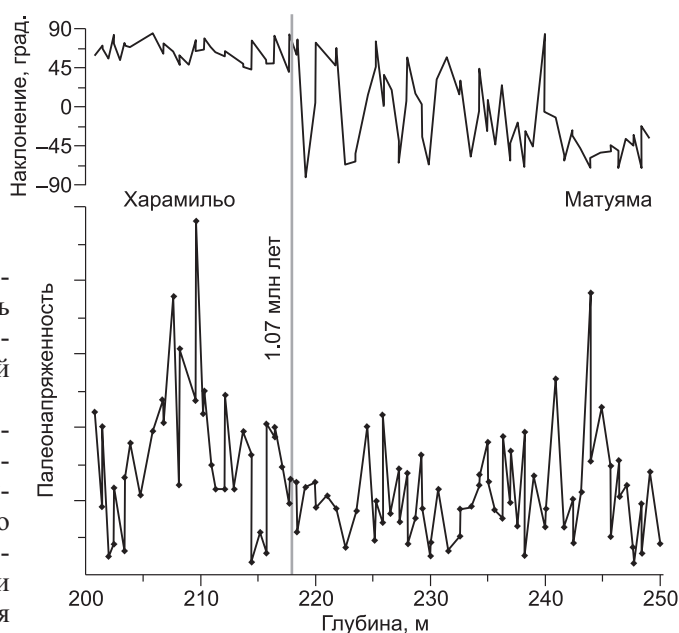
Рассмотрим графики изменения палеонапряженности отдельно для каждого интервала. На рис. 6 и 7 показано изменение палеонапряженности в верхней и нижней частях скважины.

Для последних 420 тыс. лет поведение палеонапряженности в Байкальском регионе совпадает в целом с общемировой, хотя имеются и свои особенности (см. рис. 6). По нашему мнению, наиболее хорошая сходимость между двумя кривыми наблюдается в интервале 30—200 тыс. лет назад. В связи с

\* Основные технические характеристики: 1) диапазон магнитных полей  $\pm 520$  кА/м; 2) чувствительность по намагниченности не хуже 0.1 А/м; 3) чувствительность по полю не хуже 10 А/м; 4) автоматическая калибровка в процессе измерения; 5) количество одновременно измеряемых образцов — 6 шт.; 6) номинальный размер образца —  $10 \times 10 \times 10$  мм.



**Рис. 7. Изменение магнитного наклонения (верхний график) и величины палеонапряженности (нижний график) в осадках скв. BDP-99 в период инверсии Харамильо—Матуяма.**



существованием возможности иных интерпретаций полученных результатов, возможность использования палеонапряженности байкальских осадков для создания возрастных моделей остается спорной.

Для отрезка, в который попала смена полярности Харамильо—Матуяма, видно уменьшение величины напряженности в период инверсии приблизительно в 5 раз относительно «спокойного» интервала (см. рис. 7). При сопоставлении полученной временной зависимости палеонапряженности с графиком наклонения видно, что на пилообразный отрезок кривой наклонения приходятся минимальные значения палеонапряженности, что, как мы уже отмечали выше, является признаком многократной смены полярности в течение инверсии Харамильо—Матуяма. Подобное понижение палеонапряженности происходило и во время экскурсов (см. ниже). Таким образом изменение наклонения магнитного поля обязательно отражается пониженными значениями интенсивности поля. С другой стороны, нельзя не отметить, что обратное утверждение, строго говоря, неверно: пониженные значения напряженности могут наблюдаться и в интервалах с постоянным направлением магнитного поля.

### ЭКСКУРСЫ

Зная скорость осадконакопления, рассчитанную по биостратиграфическим исследованиям [Khursevich et al., 2005] (16.15 см/тыс. лет), мы выделили 4 экскурса на кривой палеонапряженности для верхней части осадков скв. BDP-99: Лашамп, Блейк, Бива-1 и Бива-3 (35—45, 110—130, 180—200 и 360—390 тыс. лет соответственно). Местоположение экскурсов определялось по минимальным значениям палеонапряженности. На кривой наклонения естественной остаточной намагниченности осадков данные экскурсы обнаружить не представляется возможным, хотя в скважинах BDP-96 и BDP-98 часть из них была обнаружена именно по уменьшению наклонения магнитного поля [Коллектив..., 1998, 2000]. Это в очередной раз подтверждает необходимость исследования палеонапряженности осадочных разрезов.

### ВЫВОДЫ

Проблемы, возникшие при датировке осадка скв. BDP-99 на основе исключительно палеомагнитного метода, показали необходимость комплексного подхода к подобному виду исследований: любой метод имеет ограниченную область применения и только совместное их использование позволяет достигнуть удовлетворительных результатов.

Осадки оз. Байкал, полученные в ходе бурения на Посольской банке, являются пригодным материалом для изучения относительной палеонапряженности. Это следует из сопоставимости результатов, полученных в ходе нормировки остаточной намагниченности на величины как начальной магнитной восприимчивости, так и нормальной намагниченности, созданной в постоянном поле.

Возможность использовать палеонапряженность как независимый метод датирования байкальских осадков остается спорной. В то же время определение экскурсов с помощью данных по интенсивности магнитного поля, несомненно, более достоверно, чем при использовании только кривой наклонения.

Во время инверсии Харамильо—Матуяма, равно как и во время экскурсов, величина палеонапряженности уменьшалась в 5 раз и более относительно периодов без смены полярности. Отрезку с минимальными значениями палеонапряженности соответствует пилообразный участок на графике наклонения магнитного поля, что позволяет сделать вывод о том, что инверсия Харамильо—Матуяма про-

должалась приблизительно 10 тыс. лет, что согласуется с данными Г.З. Гурария с соавторами [2002] по разрезу аджижренинской свиты (Туркмения). Однако низкие значения напряженности поля могут встречаться и в периоды однонаправленной полярности, так что данный вопрос требует дальнейшего изучения.

В заключение я хочу высказать благодарность всему коллективу буровиков, без которых не было бы материала для настоящего исследования; В.А. Кравчинскому, давшему полезные рекомендации в самом начале написания статьи; Н.А. Садовниковой за редакторскую правку текста; М.З. Хузину, указавшему, на какие особенности методики необходимо сделать акцент; Д.В. Метелкину, глубоко вникшему в работу в ходе рецензирования и давшему ценные рекомендации по ее улучшению.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 07-05-01053-а.

## ЛИТЕРАТУРА

**Балинова В.С.** Статистика в вопросах и ответах: учеб. пособие. М., 2004, 344 с.

**Большаков В.А.** О глубине фиксации палеомагнитной записи и климатостратиграфическом положении инверсии Матуяма—Брюнес в глубоководных осадках // Физика Земли, 1999, № 6, с. 93—96.

**Гурарий Г.З., Гарбузенко А.В., Хазаров Х., Трубихин В.М.** Геомагнитное поле во время инверсии Ранняя Харамильо (Западная Туркмения) // Физика Земли, 2002, № 7, с. 72—83.

**Коллектив** исполнителей Байкальского бурового проекта. Результаты бурения первой скважины на озере Байкал в районе Бугульдейской перемычки // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (2), с. 3—32.

**Коллектив** участников проекта «Байкал-бурение». Непрерывная запись климатических изменений в отложениях озера Байкал за последние 5 миллионов лет // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (2), с. 139—156.

**Коллектив** участников проекта «Байкал-бурение». Позднекайнозойская палеоклиматическая запись в осадках озера Байкал (по результатам исследования 600-метрового керна глубокого бурения) // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (1), с. 3—32.

**Коллектив** участников проекта «Байкал-бурение». Высокоразрешающая осадочная запись по керну глубоководного бурения на Посольской банке в озере Байкал (BDP-99) // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (2), с. 163—193.

**Петрова Г.Н.** Реальность отражения изменений палеонапряженности геомагнитного поля в палеомагнитных записях осадочных пород // Физика Земли, 1998, № 8, с. 23—29.

**Петрова Г.Н., Пилипенко О.В., Распопов О.М., Трубихин В.М.** Изменение магнитного момента Земли и климата в плейстоцене // Российский журнал наук о Земле, 1999, т. 1, № 6.

**Печерский Д.М.** Палеомагнитология, петромагнитология и геология. М., ИФЗ РАН, 2006. <http://paleomag.ifz.ru/books/Pechersky.htm>

**Поспелова Г.А.** Экскурсы геомагнитного поля хрона Брюнес и глобальные климатические изменения // Физика Земли, 2000, № 8, с. 3—14.

**Поспелова Г.А.** О геомагнитных экскурсах // Физика Земли, 2002, № 5, с. 30—41.

**Хурсевич Г.К., Карабанов Е.Б., Прокопенко А.А., Вильямс Д.Ф., Кузьмин М.И., Феденя С.А., Гвоздков А.Н., Кербер Е.В.** Детальная диатомовая биоистратиграфия осадков озера Байкал в эпоху Брюнес и климатические факторы видообразования // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (1—2), с. 108—129.

**BDP-99** Baikal Drilling Project Members. A new Quaternary record of regional tectonic, sedimentation and paleoclimate changes from drill core BDP-99 at Posolskaya Bank, Lake Baikal // Quatern. Intern., 2005, v. 136, p. 105—121.

**Channell J.E.T., Xuan C., Hodell D.A.** Stacking paleointensity and oxygen isotope data for the last 1.5 Myr (PISO-1500) // Earth Planet. Sci. Lett., 2009, 283, p. 14—23.

**Gradstein F., Ogg J., Smith A.** A geological time scale. Cambridge, 2004, 610 p.

**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.

**Khursevich G.K., Prokopenko A.A., Fedenya S.A., Tkachenko L.I., Williams D.** Diatom biostratigraphy of Lake Baikal during the past 1.25 Ma: new results from BDP-96-2 and BDP-99 drill cores // Quatern. Intern., 2005, v. 136, p. 95—104.

**Opdyke N.D., Channell J.E.T.** Magnetic stratigraphy PDF. International Geophysics Series, 1996, v. 64. Academic Press, New York, London, 1996, 360 p.