

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗ. БАУНТ (Северное Забайкалье)

М.А. Крайнов¹, Е.В. Безрукова^{1,2}, Е.В. Кербер¹, О.В. Левина¹,
Е.В. Иванов¹, А.А. Щетников³, И.А. Филинов³

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

² Институт археологии и этнографии СО РАН, 630090, Новосибирск, ул. Академика Лаврентьева, 17, Россия

³ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

В марте 2014 г. со льда оз. Баунт было осуществлено бурение донных отложений в наиболее глубокой точке котловины озера (33 м). Мощность опробованного разреза составила 13.7 м. Возраст основания разреза оценивается в 28—30 тыс. лет. Литологическое изучение осадков показало, что в верхней части осадочного разреза преобладают диатомовые илы, доля которых по направлению к основанию разреза снижается, а алевритистых глин — возрастает.

Полученные результаты изменения петромагнитных параметров, содержания биогенного кремнезема, плотности осадка свидетельствуют о значительных изменениях условий осадконакопления в позднем плейстоцене и голоцене. Проведено сопоставление указанных параметров с реконструированной динамикой ландшафтов и климата за этот период времени, полученной из осадочного разреза оз. Котокель. Показано, что донные отложения оз. Баунт надежно фиксируют региональный палеоклиматический сигнал.

В палеомагнитной записи обнаружены экскурсы Гетеборг и Моно Лейк — впервые для озер Байкальского региона.

Озерные осадки, плейстоцен, голоцен, палеоклимат, палеомагнетизм, экскурсы, литология, Забайкалье

FIRST RESULTS OF STUDY OF LAKE BAUNT BOTTOM SEDIMENTS (northern Transbaikalia)

M.A. Krainov, E.V. Bezrukova, E.V. Kerber, O.V. Levina,
E.V. Ivanov, A.A. Shchetnikov, and I.A. Filinov

In March 2014, the Lake Baunt bottom sediments were drilled in the deepest part of the lake basin (33 m). The penetrated interval is 13.7 m thick, with the age of the base being evaluated at 28–30 ka. Lithological study of the penetrated sediments demonstrates the upper part of the section dominated by diatom ooze, whose concentration decreases gradually downward the section, up to the replacement of the ooze by silty clay. The obtained data on variations in petromagnetic parameters, concentration of biogenic silica, and sediment compaction indicate considerable variations of sedimentary environments during the Late Pleistocene and Holocene. Being compared with the previously reconstructed landscape and climate dynamics for the sedimentary succession of Lake Kotokel for this time interval, the above parameters reveal that the Lake Baunt bottom sediments reliably fix the regional paleoclimate signal. For the first time for lakes of the Baikal region, Gothenburg and Mono Lake magnetic excursions are identified in the paleomagnetic record of the Lake Baunt section.

Transbaikalia, lacustrine sediments, Pleistocene, Holocene, paleoclimate, paleomagnetism, excursions, lithology

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведутся активные работы по изучению осадочных отложений озер Байкальского региона, как крупных (Байкал, Хубсугул) [Коллектив..., 2004], так и небольших (Духовое, Арахлей, Котокель и др.) [Безрукова и др., 2011; Решетова и др., 2013, Mackay et al., 2013]. Озерные отложения привлекают исследователей непрерывными осадочными разрезами возрастом от первых тысяч до миллионов лет. Получаемые при их изучении сведения ведут к более глубокому пониманию имеющихся представлений об изменениях природной среды данного региона.

Большинство ранее изученных озерных объектов располагаются на широтах Центральной или Южной котловин оз. Байкал. Это такие озера, как Цаган-Тырм [Скляров и др., 2010], Намши-Нур [Со-

лотчина и др., 2011], Халл в Приольхонье [Maskay et al., 2013], Очки [Леонова и др., 2015], Котокель [Tarasov et al., 2009; Bezrukova et al., 2010; Леонова и др., 2015], Черное, Духовое [Тарасов и др., 2002], Арахлей [Решетова и др., 2013]. Возраст подавляющей части осадочных записей из донных отложений этих озер не превысил 14 тыс. лет. Только керн из донных отложений оз. Котокель стал основой уникальной для Байкальского региона непрерывной реконструкции ландшафтов, диатомовой флоры и климата за последние 48 тыс. лет [Bezrukova et al., 2010]. Однако ни один керн из перечисленных выше озер не был изучен палеомагнитным методом. Этот метод применялся ранее только к донным отложениям озер Байкал и Хубсугул [Коллектив..., 2004, 2007]. Теперь он применен и к отложениям оз. Баунт. Следовательно, предлагаемая в настоящей статье реконструкция условий осадконакопления в оз. Баунт имеет научную новизну, потому что она, во-первых, имеет уникальную для Байкальского региона продолжительность почти в 30 тыс. лет, во-вторых, базируется на первых для малых пресных озер Байкальского региона результатах петромагнитных исследований и, в-третьих, впервые характеризует эволюцию природной среды глубоко внутриконтинентальной, северной территории Забайкалья, расположенной в 200 км восточнее оз. Байкал и севернее 55° с.ш. в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты.

ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗ. БАУНТ

Озеро Баунт расположено на высоте 1060 м над уровнем моря на севере Республики Бурятия (рис. 1). Его глубина достигает 33 м при средних значениях 17 м. Максимальную протяженность (19 км) озеро имеет в направлении юго-запад—северо-восток при наибольшей ширине 9 км. Площадь акватории составляет 111 км². Основные притоки: реки Верхняя Ципа и Ципикан. Из озера вытекает р. Нижняя Ципа.

Озеро Баунт имеет тектоническое происхождение [Щетников, 2007]. В целом морфология дна оз. Баунт согласуется с субэаральным рельефом его рифтогенной впадины, а контуры изобат повторяют очертания береговой линии водоема. Исключение составляет одна важная структурная особенность — зона максимальных глубин озера смещена от его геометрического центра к юго-востоку. Это нарушает характерную для байкальской рифтовой зоны морфологическую асимметрию строения впадин, в том числе озерных. Обычно рифтогенные депрессии Прибайкалья имеют форму одностороннего грабена с тяготеющей к сбросовому уступу областью максимальных скоростей тектонических погружений и, соответственно, глубин в рифтовых водоемах. Морфология котловины оз. Баунт имеет обратную байкальской асимметрию со смещением «абиссальной» зоны от подножия, ограниченного крутым сбросовым уступом наклонного горста, к противоположному, более пологому крылу сводового поднятия. Само озеро прижато к склонам именно горстового поднятия, в которое оно активно ингрессирует, заполняя входящие углы впадины в это ее горное обрамление. Береговая зона здесь морфологически юна — и в крупных чертах, и в мелких деталях она повторяет топографию субэарального рельефа. При этом окружающие на востоке озеро аккумулятивные равнины несут хорошо морфологически выраженные следы отступления [Щетников, 2015] — здесь расположено 12 древних береговых валов высотой до 2.5 м и шириной до 40 м.

Все это свидетельствует об активной новейшей геодинамике баунтовской впадины и переукладке блоков ее фундамента.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор точки бурения. В ноябре 2013 г. была проведена батиметрическая съемка оз. Баунт с помощью трехмерного 6-лучевого эхолота Humminbird Matrix 748x3D. Полученная в ходе обработки данных карта приведена на рис. 1. Для бурения была выбрана точка, расположенная на максимальном удалении от береговых склонов, что позволяло ожидать равномерные скорости осадконакопления. Глубина в этом месте оказалась наибольшей на озере и составила 33 м.

Техника бурения. Буровые работы велись с применением гравитационного керноотборного устройства ударно-канатного типа UWITEC (Австрия) с внутренним диаметром ПВХ лайнера 63 мм. В марте 2014 г. буровая установка была смонтирована на льду озера, и в течение трех дней был получен керн длиной 13.7 м в восьми лайнерах. Выход осадка составил 95 %. Координаты места отбора: 55°11'15" с.ш. и 113°01'45" в.д.

Опыт бурения показал, что март является наилучшим месяцем для буровых работ на озерах, подобных Баунту. Толщина льда в этот период года максимальна и достигает двух метров, подвижки ледяного поля отсутствуют.

Концентрация биогенного кремнезема SiO_{26ию} определена для каждого пятого сантиметра отложений керна по общепринятой методике [Mortlock, Froelich, 1989] с осуществлением выщелачивания осадка и последующим анализом полученной взвеси на спектрофотометре Unicо 1200/1201 с использованием цветной реакции молибдата аммония. Результаты приведены на рис. 2.

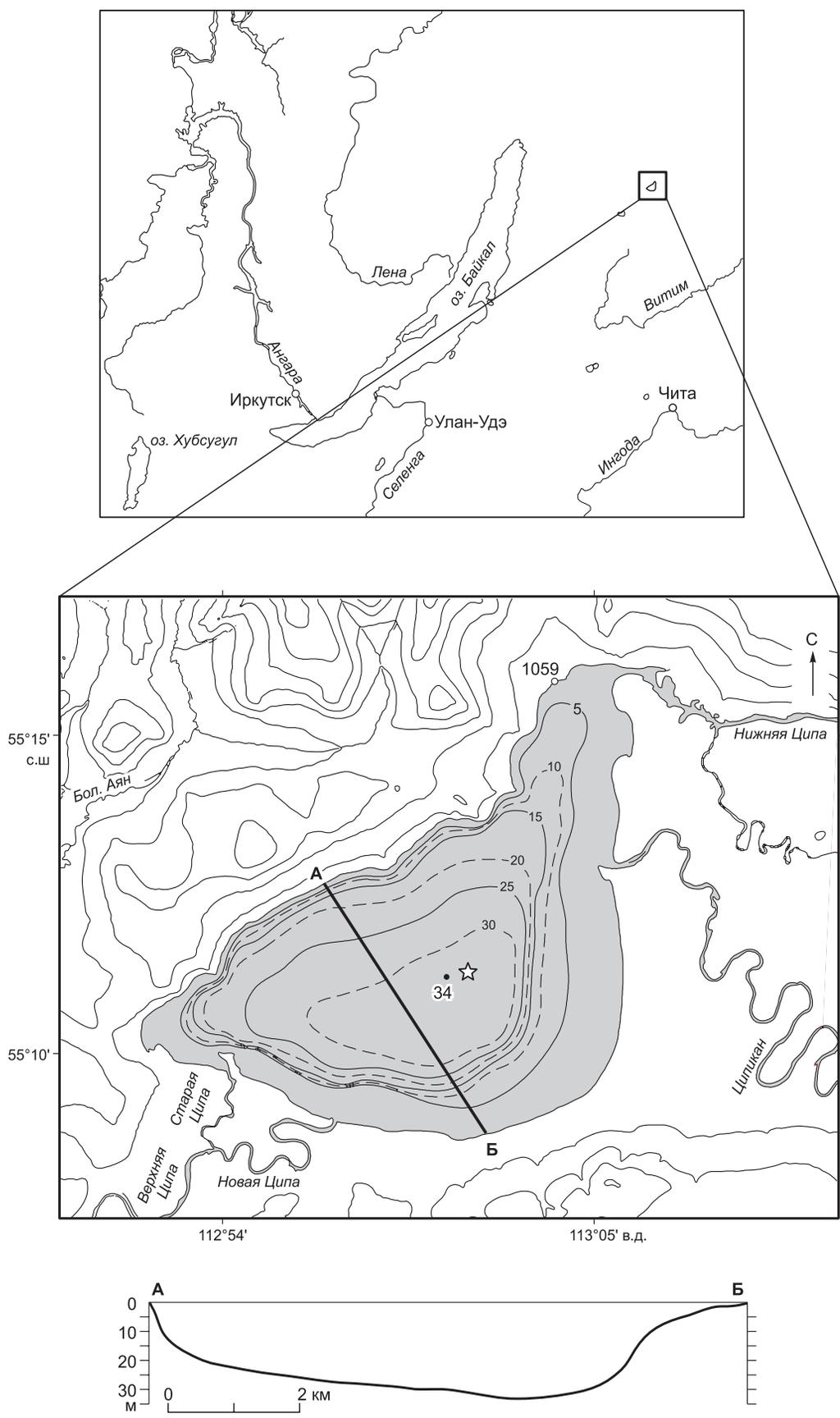


Рис. 1. Карта оз. Баунт.

Звездочкой отмечено место бурения скважины.

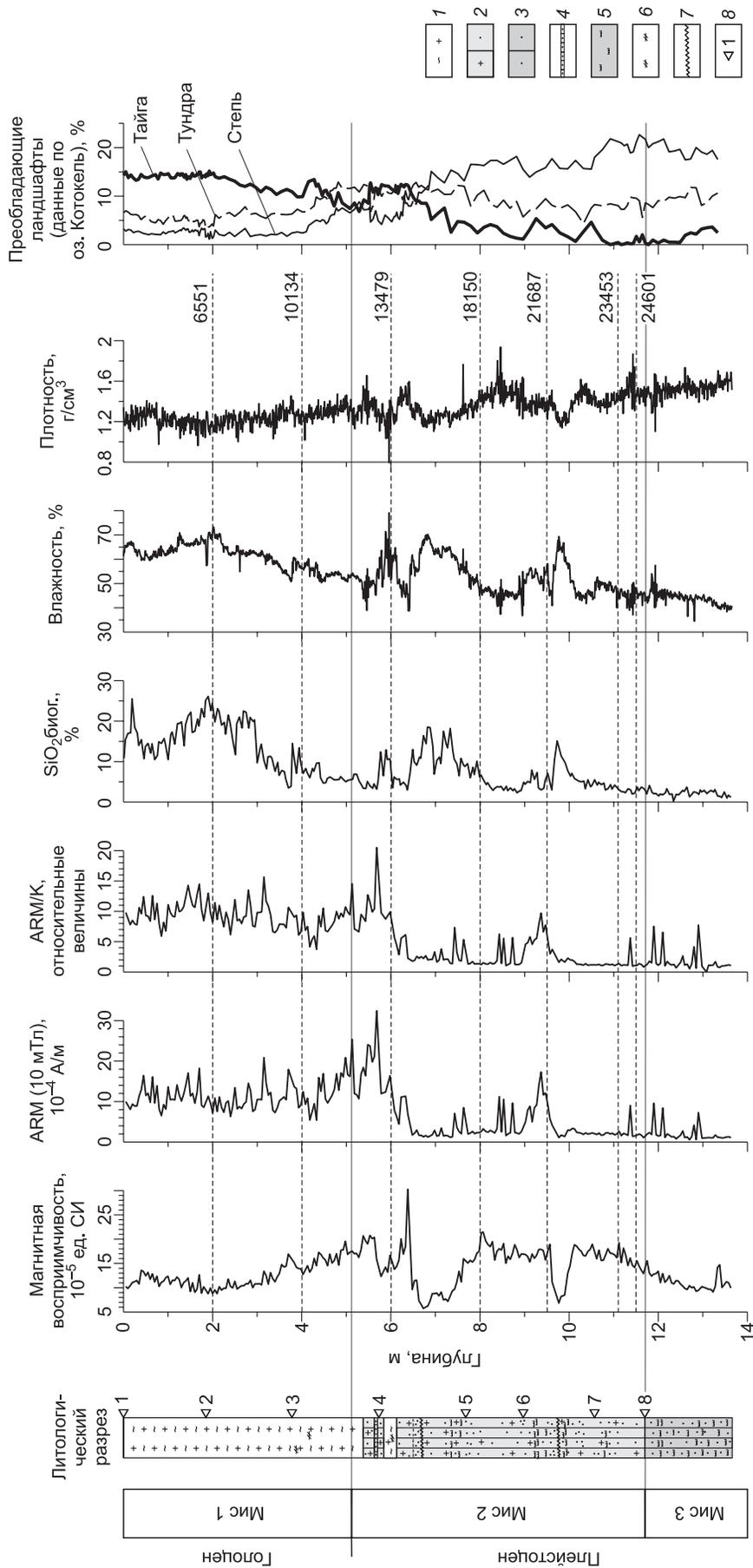


Рис. 2. Литологический разрез и кривые распределения литологических, физических и петромагнитных параметров осадков в разрезе Байкал-Унт-2014 в сопоставлении с динамикой природных ландшафтов по результатам палинологических исследований оз. Котоколь.

1 — диатомовый ил, 2 — алевритистая глина с диатомовыми, 3 — алевритистая глина, 4 — прослой глинистого алеврита, 5 — гидротроилит ($FeS \cdot nH_2O$), 6 — углефицированные растительные остатки, 7 — разрывные нарушения в керне, 8 — номера лотов. Цифры к штриховым линиям являются калиброванными значениями возраста (см. таблицу).

Физические свойства донных отложений. Влажность, плотность и объемная плотность сухого вещества осадка рассчитана для каждого сантиметра осадка с применением известных методов [Коллектив..., 1995, 2004]. Всего проанализировано 1365 проб объемом 1 см³ каждая. Образцы взвешивали на весах OHAUS Explorer, после чего высушивали в течение трех дней при температуре 60 °С, затем осуществляли повторное взвешивание.

Абсолютное датирование отложений. Для оценки возраста керна в радиоуглеродной лаборатории г. Познань (Польша) были получены семь AMS¹⁴C датировок по общему органическому веществу с глубин керна 200, 400, 600, 800, 950, 1110 и 1150 см соответственно. Измеренные значения были приведены в соответствие с календарным возрастом с использованием калибровочной кривой INTCAL 13 [Reimer et al., 2013]. Расчеты калиброванного возраста проводились в программе OxCal 4.2 [Ramsey, 2009].

Палеомагнитные и петромагнитные исследования. Ориентированные образцы для палеомагнитных исследований были отобраны с шагом 5 см, что в сумме составило 259 образцов. Согласно возрастной модели (см. ниже), из голоценовых отложений было отобрано 99 образцов, из плейстоценовых — 160, включая 115 образцов с горизонта, соответствующего МИС 2 и 45 образцов — с МИС 3. Позже дополнительно было отобрано еще 18 образцов с трех горизонтов (с каждого по 6 штук) с детальным шагом 2 см для подтверждения предположительно обнаруженных экскурсов.

Палеомагнитные измерения осуществлялись на спин-магнитометре JR-6 (Agico, Чехия). Размагничивание образцов проводилось в магнитном вакууме самодельной установки. Намагничивание производилось в магнитном поле Земли. Магнитная восприимчивость измерялась на капнометре KLY-2.

У всех образцов была измерена первичная остаточная намагниченность (NRM). С целью определения пригодности донных осадков оз. Баунт для палеомагнитных исследований 25 образцов были размагничены детально ступенчатыми переменными магнитными полями 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 мТл. Оставшиеся образцы размагничивались переменными магнитными полями в 10, 20 и 40 мТл. При этих же величинах поля образцы дважды намагничивались в современном поле Земли — по оси *z* (направлена вдоль керна) и против нее. На основе полученных данных рассчитывалась безгистерезисная остаточная намагниченность (ARM) для трех величин переменного поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Абсолютные датировки семи изученных горизонтов приведены в таблице. Далее в тексте статьи все значения возраста приводятся в калиброванном исчислении. Эти значения мы использовали для построения возрастной модели, базируясь на линейной интерполяции между соседними датами. Положение датированных уровней по глубине керна Баунт-2014 показывает тренд постепенного повышения возраста с увеличением глубины в керне, позволяя предполагать практически непрерывное осадконакопление за изученный временной интервал. Средняя рассчитанная скорость осадконакопления составляет 44 см/тыс. лет. Возраст основания скважины оценен в 28—30 тыс. лет.

Литологическое изучение показало, что донные отложения оз. Баунт сформированы биогенно-терригенными илами и ледниково-озерными глинами (см. рис. 2). Верхняя часть разреза (0—540 см) представлена диатомовыми илами с высокой долей органической составляющей. Текстура илов преимущественно массивная, преобладают темно-оливковый оттенок осадка. Диатомовые водоросли представлены как циклическими, так и пеннатыми формами. На протяжении всего интервала наблюдаются различные вариации как количества, так и размеров створок диатомей. На уровнях 380 и 480 см от поверхности озера наблюдаются углефицированные остатки древесины и травы. Средняя часть разреза (540—1170 см) представлена алевритистыми глинами с диатомовым материалом в различных пропорциях, обогащенными крупнозернистыми фракциями алеврита и песка. Практически по всему интервалу распространены линзы, вкрапления и гнезда алеврита и песка. Этот интервал керна характеризуется

Датировка осадков скв. Баунт-14 методом AMS¹⁴C

Глубина в керне, см	¹⁴ C возраст, лет назад	Калиброванные значения возраста, лет назад
200	5775±30	6551±50
400	9000±50	10134±100
600	11620±50	13479±130
800	14930±70	18150±240
950	18220±80	21687±330
1110	18850±120	23453±330
1150	20680±140	24601±270

преобладанием осадков с косослоистой, неясно-слоистой и пятнистой текстурой, что может быть обусловлено как проявлением слоев различной ритмичности, так и распространением пятен, тонких прослоев и вкраплений гидротроилита. Цвет осадка варьирует от темно-оливкового до светло-серого. В местах окисления цвет осадка стремится к оливково-желтым оттенкам, также меняется и его текстура. Диатомовые водоросли распространены практически повсеместно, однако размеры створок и их количество варьируют по интервалу. На глубине 600 см наблюдаются углефицированные остатки древесины. Нижняя часть разреза (1170—1366 см) представлена алевритистой глиной, в значительной мере обогащенной крупнозернистым алевритом и песком. Текстура осадка неясно-слоистая, обусловлена неравномерным обогащением крупными фракциями песка и алеврита, а также неравномерными включениями и прослоями гидротроилита. Цвет осадка — серый. В этом интервале встречаются единичные створки диатомовых водорослей циклических и пеннатных форм.

Измерение концентрации биогенного кремнезема показало, что максимальные значения его концентраций до 28 % наблюдаются в верхней части разреза, в интервале 0—300 см. Ниже встречается еще несколько интервалов со значительным содержанием биогенного кремнезема. С глубины 1030 см и по направлению к основанию керна значения его концентраций снижаются, иногда значительно (от 0.2 до 4.5 %) (см. рис. 2).

Изучение физических свойств осадка показало, что содержание влаги уменьшается от 60—65 % в верхней части разреза до 40 % в его нижней части (рис. 2). Это может быть объяснено гравитационным уплотнением осадка. Следует отметить два максимума значений влажности на глубинах 600 и 1000 см соответственно. Плотность осадков также возрастает с глубиной, изменяясь от 1.2 г/см³ в верхней части разреза до 1,6 г/см³ в нижней.

Результаты измерения магнитной восприимчивости и безгистерезисной намагниченности приведены на рис. 2. Магнитная восприимчивость (κ) плавно возрастает на верхних 550 см от 10 до $15\text{—}20 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. На глубинах от 550 до 800 см — наблюдаются наиболее резкие ее изменения. На этом участке значения κ достигают как максимальных, так и минимальных на всем разрезе: 5 и $30 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. На глубинах 800—950 см магнитная восприимчивость незначительно колеблется около величины $15\text{—}20 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Отрезок 950—1020 см характеризуется ее существенным падением до $7\text{—}10 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, после чего значения возвращаются до $\sim 15\text{—}20 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Начиная с глубины 1020 см до основания разреза магнитная восприимчивость медленно уменьшается до $10 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

Значения безгистерезисной намагниченности на верхних 550 см меняются в пределах $10\text{—}20 \cdot 10^{-4}$ А/м, после чего в интервале 550—650 см резко уменьшаются до $1\text{—}2 \cdot 10^{-4}$ А/м, оставаясь такими до основания разреза, за исключением кратковременного роста до $10\text{—}12 \cdot 10^{-4}$ А/м в интервале 900—1000 см.

Примеры детального ступенчатого размагничивания образцов переменным магнитным полем показаны на рис. 3. На диаграммах Зийдервельда видно, что слабая вязкая компонента целиком снимается полем 10 мТл, после чего остается единственная компонента, возникшая в момент осадконакопления. Кривые модуля естественной остаточной намагниченности демонстрируют, что у образцов верхней части разреза (выше 600 см) переменным магнитным полем 100 мТл разрушается 15—30 % естественной остаточной намагниченности, у образцов, взятых ниже, подобное поле разрушает около 70 % ЕОН.

Наклонение магнитного поля на протяжении большей части разреза колеблется около 60°, что соответствует положительной полярности эпохи Брюнес. Исключения наблюдаются на глубинах 2.25, 5.9 и 11.9 м, что предварительно было охарактеризовано как возможные экскурсы Соловки, Гетеборг и Моно соответственно. В первом и втором случаях «выбросы» давали по одному образцу, во втором случае — два. Для уточнения предположительных экскурсов из архива было отобрано дополнительно по 6 образцов с каждого из трех горизонтов с шагом 2 см. Результаты измерений, представленные на рис. 4, свидетельствуют о достоверном выделении двух палеомагнитных событий: на глубинах 5.9 м (5 образцов) и 11.9 м (8 образцов). Экскурс Соловки не был подтвержден: на глубине 2.25 м присутствует единственный артефакт.

Модуль ЕОН по разрезу меняется в широких пределах. Так, в интервалах 0—650 и 890—950 см в периоды стабильной полярности его значения колеблются в диапазоне $20\text{—}40 \cdot 10^{-3}$ А/м. На глубинах 650—890 и глубже 950 см они падают до $1\text{—}3 \cdot 10^{-3}$ А/м. Во время экскурса на глубине 5.9 см значения ЕОН уменьшаются до $8\text{—}15 \cdot 10^{-3}$ А/м, а на глубине 11.9 см — до $0.2\text{—}0.6 \cdot 10^{-3}$ А/м соответственно (см. рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для Забайкальского региона, на севере которого располагается котловина оз. Баунт, нет других столь длительных записей, характеризующих изменения природной среды за последние почти 30 тыс. лет. Однако запись сопоставимого возраста известна для южной части этого региона, и получена она из

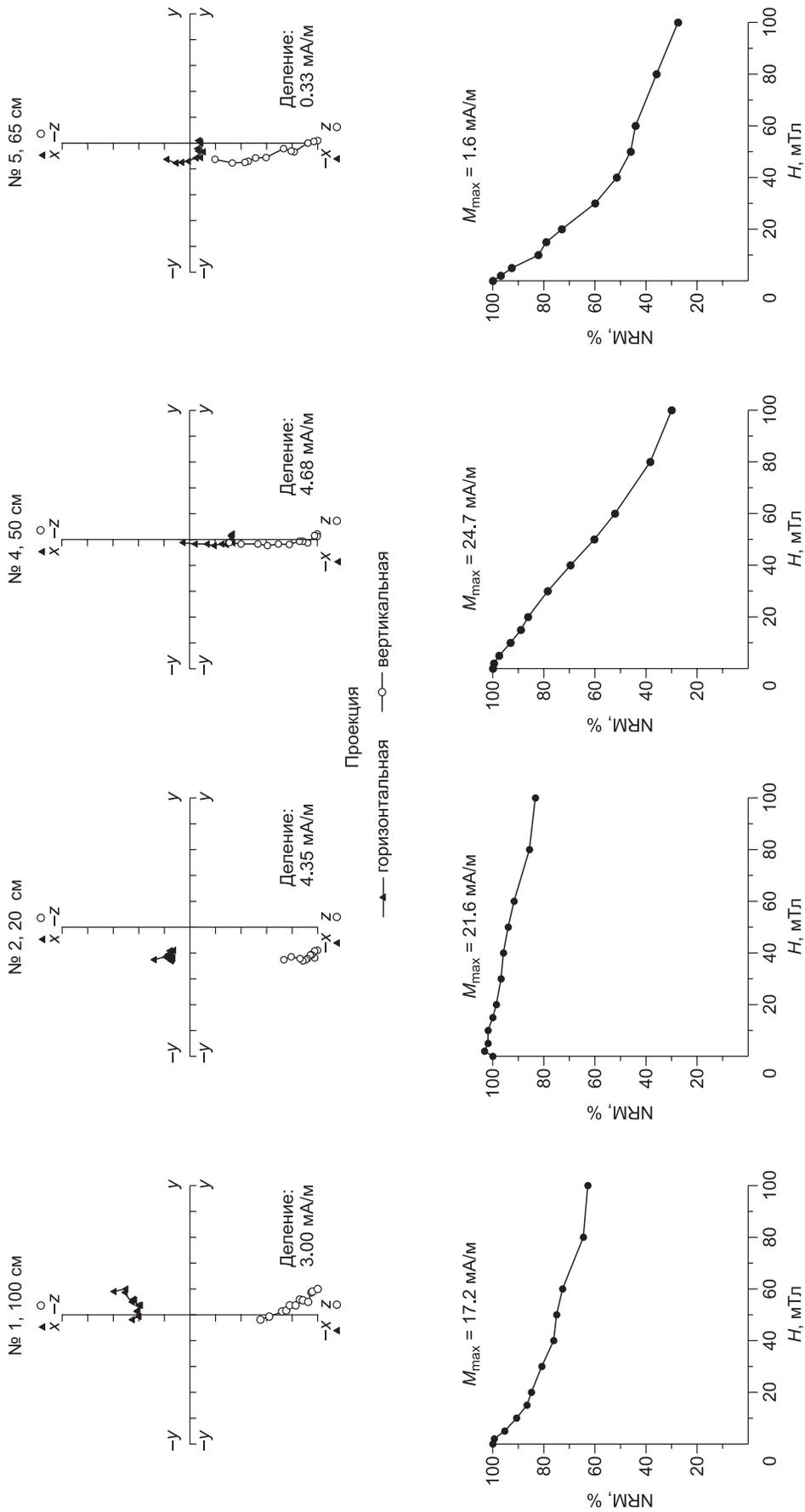


Рис. 3. Примеры детального размагничивания отдельных образцов.

Вверху приведены диаграммы Зейдверльда, внизу — спад модуля намагниченности. Указаны номера лотов и глубина отбора образцов в лотах.

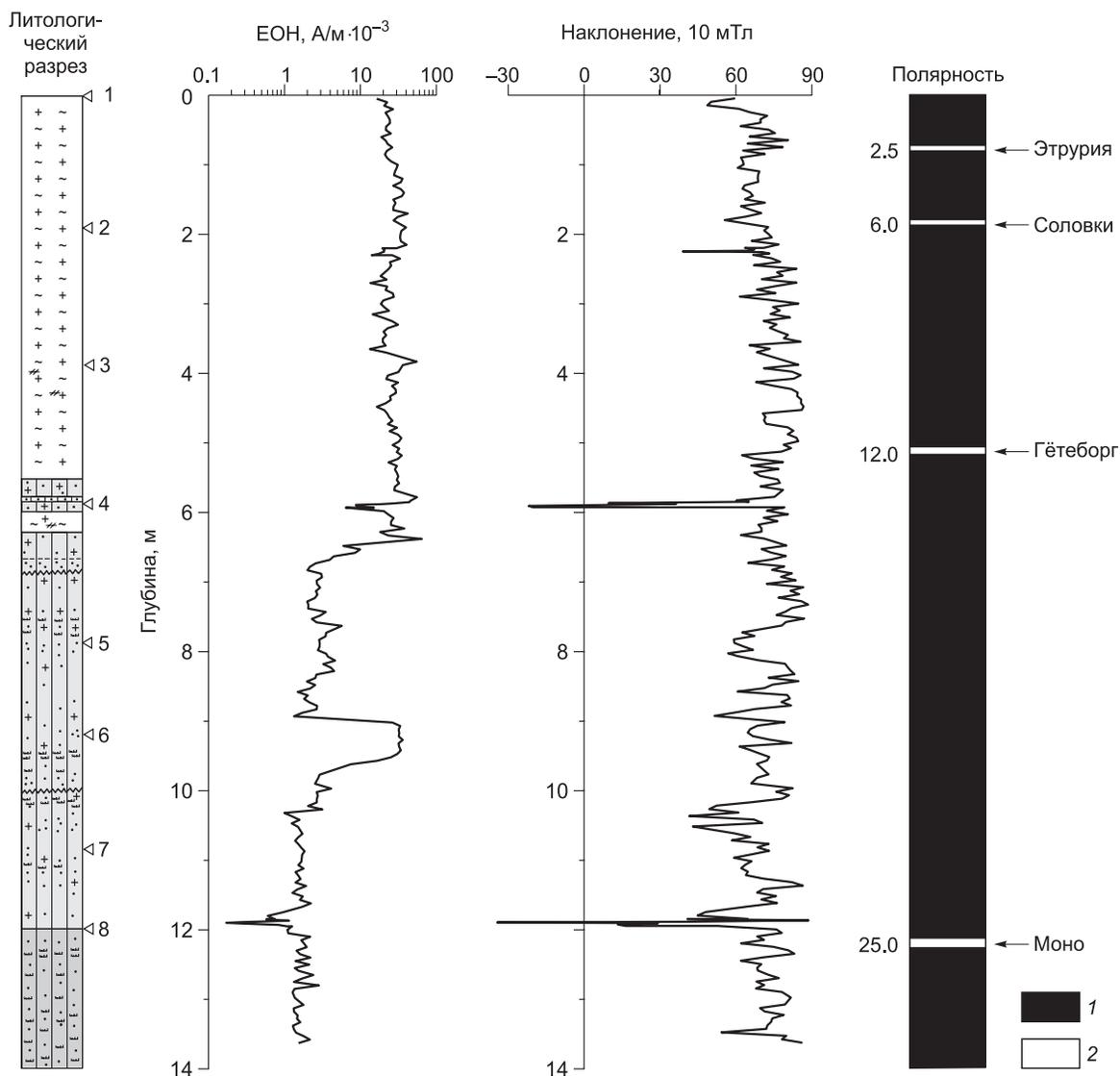


Рис. 4. Наклонение магнитного поля и ЕОН осадка скв. Баунт-2014 в сопоставлении с литологическим разрезом и магнитостратиграфической шкалой.

Условные обозначения к литологическому разрезу см. рис. 2. Слева от названий экскурсов указаны их принятые возрасты (в тыс. лет) [Постановления..., 2013]. 1 — прямая полярность; 2 — обратная полярность.

оз. Котокель [Bezrukova et al., 2010; Müller et al., 2014]. Поэтому для понимания причин возможного изменения приведенных в настоящей статье характеристик донных отложений оз. Баунт, использована корреляция записей природной среды из озер Баунт и Котокель. Использовать сравнительные характеристики стало возможным на основе значительного количества определений абсолютного возраста для обеих записей, полученных в одной лаборатории и ставших основой надежных возрастных моделей. На рис. 2 приведен обобщающий график, на котором динамика показателей природной среды из отложений оз. Баунт сравнивается с динамикой ландшафтов в бассейне оз. Котокель.

Результаты показывают, что в осадках оз. Баунт в конце каргинского интерстадиального периода позднего плейстоцена — временного аналога морской изотопно-кислородной стадии 3 (МИС 3), накопившихся ранее 17 тыс. л.н., отмечены самые низкие значения SiO_2 биог., ARM, ARM/К. При этом в осадочных отложениях оз. Баунт переход от плейстоцена к голоцену зафиксирован пока ранее не наблюдавшимся ни в одном озерном осадочном разрезе Байкальского региона образом. Это нашло отражение в следующих особенностях изменения петромагнитных параметров.

Отношение ARM к магнитной восприимчивости принимает максимальные значения в осадках верхних шести метров разреза. Это свидетельствует о малой величине магнитных зерен на этом интер-

вале, что совпадает и с результатами литологического изучения керн (см. рис. 2), показывающих переход выше глубины 6 м к господству в отложениях диатомовых органических илов.

Высокая неоднородность размера магнитного зерна не позволила нам рассчитать палеонапряженность, как это удавалось сделать для осадков оз. Байкала [Kravchinsky et al., 2007; Крайнов и др., 2013].

Обратная корреляция между содержанием биогенного кремнезема и магнитной восприимчивостью наблюдается только в средней части разреза (гл. 5.5—10.5 м), в то время как в отложениях из верхних шести метров (голоцен) керн оз. Баунт зависимость между указанными характеристиками отсутствует. Глубже 10.5 м содержание биогенного кремнезема принимает минимальные околонулевые значения, потому корреляция с ними принципиально невозможна. Причина отсутствия корреляции в верхнем интервале (0—5.5 м) окончательно неизвестна. Возможно, рост магнитной восприимчивости мог происходить и в периоды потепления, так как при таянии ледников увеличивался снос обломочного материала. Другой вероятной причиной могло быть изменение кислотности озера, что способствовало изменениям в химическом составе магнитных минералов. Установление подобной причины является задачей предстоящих исследований.

На границе плейстоцена и голоцена произошло резкое изменение размера магнитных зерен, что видно из соотношения ARM/K (см. рис. 2). В то же время в палеомагнитных записях из донных отложений оз. Байкал это соотношение практически не менялось [Крайнов и др., 2013]. Причиной такого поведения отношения значений биогенного кремнезема и магнитной восприимчивости в переходный период от позднего плейстоцена к голоцену могло стать глубокое изменение природной среды в бассейне оз. Баунт, размеры бассейна и самой котловины которого на порядок меньше, чем таковые у гигантских и суперглубоких озер. К тому же оз. Баунт располагается в суровых климатических условиях, и бассейн озера лежит в пределах распространения высокогорных и среднегорных, умеренно-холодных и влажных экосистем, где повсеместно развита многолетняя мерзлота, нижняя граница которой находится на глубине 100—250 м. Глубина деятельного слоя достигает 0.5—2.0 м в зависимости от экспозиции склонов, растительного покрова и состава. Очевидно, что если для Байкальского региона реконструированные значения среднегодовых температур в сартанскую стадию оледенения (аналог МИС 2) могли быть ниже современных на 6—8 °C [Воробьева, 2010], то глубина деятельного слоя в это время была совсем незначительной, скорее всего, первые сантиметры — десятки сантиметров. Значит и степень сомкнутости растительного покрова была значительно реже современной. Все вместе могло стать причиной интенсивного сноса в озеро значительного количества крупнозернистого материала в позднем плейстоцене, в то время как переход климатической системы Земли в новое, межледниковое состояние в голоцене, повысившиеся при этом средние температуры воздуха должны были усилить процессы химического выветривания, привести к возросшей задернованности склонов котловины озера, что и стало причиной поступления в озеро относительно мелкозернистого терригенного материала. Такое состояние природной среды в позднем плейстоцене было яркой чертой бассейна оз. Котокель, расположенного южнее оз. Баунт. Там в это время господствовала степная и, в меньшей мере, тундровая растительность, свидетельствуя о холодном и аридном климате, развитии многолетнемерзлых пород. В летние сезоны активное таяние мерзлоты способствовало значительному сносу в озеро терригенного материала [Müller et al., 2014].

Максимально неблагоприятные природно-климатические условия существования лесной растительности, согласно палинологической записи из осадков оз. Котокель, имели место около 30—17 тыс. л.н., соответствуя наступлению последней, сартанской стадии позднплейстоценового оледенения — временного аналога морской изотопно-кислородной стадии 2 (МИС 2). Этому периоду как раз и соответствуют минимальные значения $\text{SiO}_2_{\text{биог.}}$, ARM и ARM/K в осадках оз. Баунт. Сумма аналитических данных показывает, что в это время продуктивность экосистемы оз. Баунт в условиях холодного и аридного климата была значительно ниже современной. В водосборном бассейне озера преобладали процессы физического выветривания, существовал разреженный растительный покров, и в озеро поступал большой объем слабо переработанных в водосборе крупнозернистых минеральных осадков.

Кроме того, уменьшение размера магнитного зерна, как мы считаем, могло обуславливаться горно-долинным оледенением — вследствие деятельности ледников происходило истирание горных пород, способное уменьшить размеры частиц до глинистых [Добровольский, 2005].

Повышение уровня солнечной инсоляции позднее 17 тыс. л.н. [СОНМАР members, 1988] привело к устойчивому расширению лесной растительности в бассейне оз. Котокель и должно было привести к улучшению условий природной среды в бассейне оз. Баунт, повышению биопродуктивности озерной системы. Повышение значений концентраций $\text{SiO}_2_{\text{биог.}}$, снижение плотности и повышение влажности осадков оз. Баунт как раз и могло стать следствием снижения потока терригенного материала с берегов озера, где растительный покров стал гуще. Такое повышение продуктивности озерной системы позднее 17 тыс. л.н., продолжавшееся до 13.5 тыс. л.н. (см. рис. 2), соотносится с расширением древесно-кустарниковой растительности в бассейнах озер Котокель, Арахлей [Решетова и др., 2013] в условиях повышения температуры воздуха, увеличения слоя протаивания многолетнемерзлых пород.

Для отложений, аккумуляция которых проходила позднее 13.5 — ранее 10.1 тыс. л.н. (см. рис. 2), снова стал характерен тренд снижения влажности, ARM/K, и, соответственно, повышение показателей плотности, а значения концентраций SiO_2 биог. изменяются, повышаясь в крайне незначительных пределах от 5 до 7 %, показывая два коротких периода их повышения от 7 до 14 % как раз у верхней и нижней границ этого интервала, при этом нижняя граница в 13.5 тыс. л.н. соответствует потеплению интерстадиала Аллеред, а верхняя — потеплению климата раннего голоцена. Имеющиеся для Байкальского региона реконструкции природной среды этого времени предполагают снижение летних и зимних температур и атмосферного увлажнения [Tarasov et al., 2005, 2009]. В оз. Котокель усилились эрозионные процессы, приведя к повышенному сносу в озеро минеральной составляющей [Shichi et al., 2009; Bezrukova et al., 2010]. На этот временной интервал приходится глобальное ухудшение климата, определяемое как поздний дриас и нашедшее отражение в донных отложениях оз. Байкал [Demske et al., 2005; Horiuchi et al., 2008; Mackay et al., 2011]. В Байкальском регионе ~ 14.7—12.8 тыс. л.н. климат становился теплее и влажнее, чем за предыдущий длительный интервал от 47.0 до 14.7 тыс. л.н., и это выразилось в повышении уровня малых озер, степени облесенности их бассейнов [Bezrukova et al., 2010; Müller et al., 2014]. Последующее ухудшение климата около 12.8—10.1 тыс. л.н. соответствовало периоду пониженной продуктивности озерных экосистем [Mackay et al., 2011], снижению массовых скоростей аккумуляции общего органического углерода [Watanabe et al., 2009], концентраций биогенного кремнезема и диатомовых водорослей [Prokopenko et al., 2007], сокращению площадей лесной растительности и расширению — тундровой и степной [Demske et al., 2005; Shichi et al., 2009; Bezrukova et al., 2010]. Следовательно, общее ухудшение природной среды этого интервала, записанное в осадках оз. Баунт, находится в согласии с его региональным проявлением и глобальным выражением [Svensson et al., 2008].

Позднее 10.1 тыс. л.н. в донных осадках оз. Баунт началось повышение концентраций SiO_2 биог., влажности, снижение плотности. Результаты палеомагнитного анализа показывают уменьшение размера магнитных зерен, что видно из соотношения ARM/K (см. рис. 2), и продолжающееся понижение значений магнитной восприимчивости. Сумма этих данных может свидетельствовать о существенном улучшении климата раннего голоцена и хорошо согласуется с результатами реконструкции природной среды в бассейне оз. Котокель. Последние свидетельства о начале устойчивого расширения лесных ландшафтов позднее 10 500 л.н. в ответ на значительное повышение атмосферных осадков и средних температур летних и зимних сезонов [Tarasov et al., 2009].

Самое широкое распространение бореальных лесов, имевшее место в бассейне оз. Котокель 10 500—7000 л.н., соотносится с более высокими реконструированными значениями средних температур июля и января и максимумом атмосферных осадков. Максимальные значения концентраций SiO_2 биог., высокие значения влажности и низкие — плотности соответственно наблюдаются в осадках оз. Баунт, сформированных в аналогичный интервал времени от 10 100 до 6550 л.н. Этот интервал соответствует региональному оптимуму голоцена. Сумма аналитических данных, поддерживает вывод о самых благоприятных за весь исследованный период времени условиях в бассейне озера, где происходила аккумуляция диатомовых илов. Вероятно, что распространение лесной растительности с густым травянистым покровом и в бассейне оз. Баунт приводило к снижению в нем эрозионных процессов, значительному уменьшению потока минерального крупнозернистого материала. Последнее, в свою очередь, могло стать причиной снижения значений магнитной восприимчивости и крупности зерен, в том числе и магнитных (см. рис. 2).

Реконструированные параметры природной среды позднего голоцена на юге региона показали постепенное снижение густоты древесной растительности позднее 7000 л.н. [Tarasov et al., 2005, 2009], переход климатической системы региона в новое состояние с резко континентальным климатом [Demske et al., 2005], с более высокой амплитудой средних температур летних и зимних сезонов. Снижение концентраций SiO_2 биог. в осадках оз. Баунт позднее 6550 л.н. также характеризует общее ухудшение продуктивности озерной экосистемы. Снижение значений ARM/K в это время также свидетельствует об увеличении размера магнитных зерен, что, возможно, стало следствием общего увеличения потока грубых минеральных отложений с водосбора, растительность в котором могла приобрести более разреженный характер. В ее составе, вероятно, расширились площади тундровых группировок, как и в бассейне оз. Котокель.

Отдельно следует обсудить результаты изучения направления полярности геомагнитного поля, записанной в донных отложениях оз. Баунт. На рис. 4 видно, что на глубинах 5.9 и 11.9 м наблюдаются интервалы пониженной и обратной полярности. Одновременно эти участки характеризуются пониженными значениями модуля ЕОН.

Согласно имеющимся для отложений керн Baunt-2014 значениям абсолютного возраста, верхний интервал имеет возраст 13.2 тыс. лет, а нижний — 25.8 тыс. лет, что позволяет определить их как экскурс Гетеборг (Gothenburg), первоначально установленный в Южной Скандинавии [Mörner, 1977], и экскурс Моно (Mono Lake Excursion), впервые обнаруженный в осадках оз. Моно, Калифорния [Den-

ham, Cox, 1971]. Первое обнаружение экскурсов Гетеборг и Моно в палеомагнитной записи из отложенных малых озер и установление их возрастов в новом для всего Байкальского региона объекте исследования — донных отложениях оз. Баунт — может служить еще одним подтверждением того, что эти экскурсии являются глобальными палеомагнитными событиями, и в дальнейшем сами могут быть использованы как хронологические уровни. Благодаря качественной возрастной модели и высокой разрешающей способности разреза, удалось оценить продолжительность изученных экскурсов: согласно нашей оценке экскурс Гетеборг продолжался приблизительно 100 лет, экскурс Моно — около 500.

Ранее уже было установлено, что экскурсии происходили, когда напряженность геомагнитного поля была понижена [Valet et al., 1993; Поспелова, Шаронова, 1999; и др.]. В некоторых работах с минимумами напряженности геомагнитного поля сопоставляют экскурсии геомагнитного поля и уточняют возраст экскурсов [Valet et al., 1993]. Следовательно, первое нахождение в надежно датированной палеомагнитной записи из малых озер Байкальского региона экскурсов Гетеборг и Моно, логично вписывающихся в имеющиеся схемы их глобальных проявлений, подчеркивает надежность геохронологической и палеомагнитной моделей эволюции экосистемы оз. Баунт и предоставляет исследователям дополнительные возрастные реперы голоцена и позднего плейстоцена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При бурении донных отложений оз. Баунт в 2014 г. был получен осадочный разрез мощностью 13.7 м с расчетным возрастом основания разреза в 28—30 тыс. лет. Средняя скорость осадконакопления составила 44 см/тыс. лет. Неоднородность размера магнитного зерна не позволила рассчитать палеонапряженность осадочного разреза. При этом изменение размера зерна носит характер, не наблюдаемый ранее ни в донных отложениях оз. Байкал, ни в осадочном разрезе оз. Хубсугул, что, возможно, объясняется положением оз. Баунт и его бассейна в суровых высокогорных природных условиях высоких широт Забайкалья, его относительно малым размером. Сопоставление петромагнитных характеристик, значений биогенного кремнезема и плотности отложений с реконструированной динамикой изменения природной среды в бассейне оз. Котокель, запись из отложений которого до настоящего времени рассматривается как опорная для Забайкалья, показало, что петромагнитный сигнал в донных отложениях оз. Баунт может рассматриваться как четкий отклик бассейна озера на изменения окружающей среды и климата. Установление экскурсов Гетеборг и Моно в записи из отложений оз. Баунт является важным палеомагнитным событием, служащим еще одним подтверждением их глобального проявления и возможностью дальнейшего использования этих экскурсов как дополнительные хронологические уровни. Вопрос связи между геомагнитным полем и климатическими изменениями, между петромагнитными характеристиками донных отложений озер и климатом пока остается нерешенным. Поиски таких связей продолжаются. Новая региональная петромагнитная запись из донных отложений оз. Баунт должна рассматриваться как важный вклад в решение этой проблемы.

Авторы выражают благодарность команде Международного мультидисциплинарного Байкал-Хоккайдо археологического проекта и лично его руководителю, профессору А. Веберу, без чьей доброй поддержки у нас не было бы возможности приобрести буровую установку UWITEC и реализовать проект бурения озер Забайкалья.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-17-10079, РФФИ №15-05-01644, №15-35-20293.

ЛИТЕРАТУРА

Безрукова Е.В., Тарасов П.Е., Кулагина Н.В., Абзаева А.А., Летунова П.П., Кострова С.С. Палинологическое исследование донных отложений озера Котокель (район озера Байкал) // Геология и геофизика, 2011, т. 52(4), с. 586—595.

Воробьева Г.А. Почва как летопись природных событий Прибайкалья: проблемы эволюции и классификации почв. Иркутск, Изд-во Иркут. ун-та, 2010, 205 с.

Добровольский В.В. Состав мелкозема рыхлых почвообразующих пород Восточно-Европейской равнины и его генезис // Почвоведение, 2005, № 3, с. 345—354.

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». 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.

Коллектив участников проекта «Хубсугул—бурение». Строение донных осадков озера Хубсугул: его связь с геологическими и климатическими факторами // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (11), с. 1117—1143.

- Крайнов М.А., Песков А.Ю., Косынкин А.В., Кузьмин М.И.** Запись поведения геомагнитного поля в осадках озера Байкал (скв. BDP-99) // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (11), с. 1795—1802.
- Леонова Г.А., Бобров В.А., Кривоногов С.К., Богуш А.А., Бычинский В.А., Мальцев А.Е., Аношин Г.Н.** Биогеохимические особенности формирования сапропеля в бессточных озерах Прибайкалья (на примере озера Очки) // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (5), с. 949—969.
- Поспелова Г.Л., Шаронова З.В.** Напряженность геомагнитного поля 53—22 тыс. л. н. // Физика Земли, 1999, № 10, с. 74—83.
- Постановления** Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2013, вып. 42, 64 с.
- Решетова С.А., Безрукова Е.В., Панizzo В., Хендерсон Э., Птицын А.Б., Дарьин А.В., Калугин И.А.** Растительность Центрального Забайкалья в позднеледниковье и голоцене // География и природные ресурсы, 2013, №2, с. 110—117.
- Скляров Е.В., Солотчина Э.П., Вологина Е.Г., Игнатова Н.В., Изох О.П., Кулагина Н.В., Склярова О.А., Солотчин П.А., Столповская В.Н., Ухова Н.Н., Федоровский В.С., Хлыстов О.М.** Детальная летопись климата голоцена из карбонатного разреза соленого озера Цаган-Тырм (Западное Прибайкалье) // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (3), с. 303—328.
- Солотчина Э.П., Скляров Е.В., Вологина Е.Г., Солотчин П.А., Столповская В.Н., Склярова О.А., Изох О.П., Ухова Н.Н.** Климатические сигналы в карбонатной осадочной летописи голоцена озера Намши-Нур, Западное Прибайкалье // ДАН, 2011, т. 436, № 6, с. 814—819.
- Тарасов П.Е., Дорофеев Н.И., Вишпер П.Б.** Динамика растительности Бурятии в голоцене, по данным пыльцевого и радиоуглеродного анализов озерных отложений // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2002, т. 10, № 1, с. 108—117.
- Щетников А.А.** Проблемы морфотектоногенеза озерных котловин (на примере Байкальской рифтовой зоны) // Тихоокеанская геология, 2007, т. 26, № 2, с. 18—29.
- Щетников А.А.** Морфотектоника озерных котловин Байкальской рифтовой зоны и Нижнего Приамурья: общие черты и особенности // Актуальные проблемы науки Прибайкалья. Вып. 1. Иркутск, Изд-во Института географии СО РАН, 2015, с. 259—264.
- Bezrukova E.V., Tarasov P.E., Solovieva N., Krivonogov S.K., Riedel F.** Last glacial–interglacial vegetation and environmental dynamics in southern Siberia: Chronology, forcing and feedbacks // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 296. 2010, p. 185—198.
- COHMAP members.** Climatic changes of the last 18,000 years: observations and model simulations // *Science*, 1998, v. 241, p. 1043—1052.
- Demske D., Heumann G., Granoszewski W., Nita M., Mamakowa K., Tarasov P.E., Oberhansli H.** Late Glacial and Holocene vegetation and regional climate variability evidenced in high-resolution pollen records from Lake Baikal // *Global Planet. Change*, 2005, v. 46, p. 55—279.
- Denham C.R., Cox C.R.** Evidence that the Laschamp polarity event did not occur 13,300–30,400 years ago // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1971. v. 13, p. 181—190.
- Horiuchi K., Uchida T., Sakamoto Y., Ohta A., Matsuzaki M., Shibata Y., Motoyama H.** Ice core record of ¹⁰Be over the past millennium from Dome Fuji, Antarctica: A new proxy record of past solar activity and a powerful tool for stratigraphic dating // *Quat. Geochronol.*, 2008, № 3, p. 253—261.
- Kravchinsky V.A., Evans M.E., Peck J.A., Krainov M.A., King J.W., Kuzmin M.I.** A 640 kyr geomagnetic and paleoclimatic record from Lake Baikal sediments // *Geophys. J. Int.*, 2007, v. 170 (1), p. 101—116, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03411.x, 2007.
- Mackay A.W., Swann G.E.A., Brewer T.S., Leng M.J., Morley D.W., Piotrowska N., Rioual P., White D.** A reassessment of Late Glacial — Holocene diatom oxygen isotope record from Lake Baikal using a geochemical mass-balance approach // *J. Quat. Sci.*, 2011, v. 26(6), p. 627—634.
- Mackay A.W., Bezrukova E.V., Boyle J.F., Holmes J.A., Panizzo V.N., Piotrowska N., Shchetnikov A., Shilland E.M., Tarasov P., White D.** Multiproxy evidence for abrupt climate change impacts on terrestrial and freshwater ecosystems in the Ol'khon region of Lake Baikal, central Asia // *Quat. Int.*, 2013, v. 290—291, p. 46—56.
- Mörner N.** The Gothenburg magnetic excursion // *Quat. Res.*, 1977, v. 7, № 3, p. 413—427.
- Mortlock R.A., Froelich P.N.** A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments // *Deep-Sea Res.*, 1989, v. 36, p. 1415—1426.
- Müller S., Tarasov P.E., Hoelzmann Ph., Bezrukova E.V., Kossler A., Krivonogov S.K.** Stable vegetation and environmental conditions during the Last Glacial Maximum: New results from Lake Kotokel (Lake Baikal region, southern Siberia, Russia) // *Quat. Int.*, 2014, v. 348, p. 14—24.

Prokopenko A.A., Khursevich G.K., Bezrukova E.V., Kuzmin M.I., Boes X., Williams D.F., Fedenya S.A., Kulagina N.V., Letunova P.P., Abzaeva A.A. Paleoenvironmental proxy records from Lake Hovsgol, Mongolia, and a synthesis of Holocene climate change in the Lake Baikal watershed // *Quat. Res.*, 2007, v. 68, p. 2—17.

Ramsey B. Bayesian analysis of radiocarbon dates // *Radiocarbon*, 2009, v. 51(1), p. 337—360.

Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk R.C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafflidason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M., van der Plicht J. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP // *Radiocarbon*, 2013, v. 55, № 4, p. 1869—1887.

Shichi K., Takahara H., Krivonogov S.K., Bezrukova E.V., Kashiwaya K., Takehara A., Nakamura T. Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate records from Lake Kotokel, central Baikal region // *Quat. Int.*, 2009, v. 205, p. 98—100, doi:10.1016/j.quaint.2009.02.005, available online 20 February, 2009.

Svensson A., Andersen K.K., Bigler M., Clausen H.B., DahlJensen D., Davies S.M., Johnsen S.J., Muscheler R., Parrenin F., Rasmussen S.O., Rothlisberger R., Seierstad I., Steffensen J.P., Vinther B.M. A 60 000 year Greenland stratigraphic ice core chronology // *Clim. Past*, 2008, № 4, p. 47—57, <http://www.clim-past.net/4/47/2008/>.

Tarasov P., Granoszewski W., Bezrukova E., Brewer S., Nita M., Abzaeva A., Oberhänsli H. Quantitative reconstruction of the last interglacial vegetation and climate based on the pollen record from Lake Baikal, Russia // *Clim. Dyn.*, 2005, v. 25, p. 625—637.

Tarasov P., Bezrukova E., Karabanov E., Nakagawa T., Wagner M., Kulagina N., Letunova P., Abzaeva A., Granoszewski W., Riedel F. Vegetation and climate dynamics during the Holocene and Eemian interglacials derived from Lake Baikal pollen records // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 2007, v. 252, p. 440—457.

Tarasov P., Bezrukova E., Krivonogov S. Late Glacial and Holocene changes in vegetation cover and climate in southern Siberia derived from a 15 kyr long pollen record from Lake Kotokel // *Clim. Past*, 2009, v. 5, p. 285—295.

Valet J-P., Meynadier L. Geomagnetic field intensity and reversals during the past four million years // *Nature*, 1993, v. 366, № 6452, p. 234—238.

Watanabe T., Nakamura T., Nara F.W., Kakegawa T., Nishimura M., Shimokawara M., Matusnaka T., Senda R., Kawai T. A new age model for the sediment cores from Academician Ridge (Lake Baikal) based on high-time-resolution AMS ¹⁴C data sets over the last 30 kyr: paleoclimatic and environmental implications // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2009, v. 286, p. 347—354.

*Рекомендована к печати 8 февраля 2017 г.
Н.В. Сенниковым*

*Поступила в редакцию
30 сентября 2016 г.*