

КЛИМАТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ В ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНЫХ ДОННЫХ ОСАДКАХ ОЗЕРА БАУНТ (Северное Забайкалье)

П.А. Солотчин¹, Э.П. Солотчина¹, Е.В. Безрукова^{2,3,4}, А.Н. Жданова¹

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

³Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия

⁴Иркутский научный центр СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия

Донные осадки озер различной минерализации, расположенных в котловинах внутриконтинентальных районов, представляют собой высокоразрешающие архивы изменений климата и природной среды. В статье рассматриваются результаты изучения позднеплейстоцен-голоценовых отложений пресноводного оз. Баунт — одного из озер Баунтовской (Ципинской) котловины на территории Северной Бурятии в зоне многолетней мерзлоты. Методы исследования — рентгеновская дифрактометрия (XRD), ИК-спектроскопия, лазерная гранулометрия, элементный анализ, AMS-датирование и другие. В минеральном составе донных осадков озера, возраст которых составляет ~18 тыс. лет, преобладают слоистые силикаты, кварц и полевые шпаты. Математическим моделированием сложных XRD профилей в ансамбле слоистых силикатов установлены хлорит, мусковит, иллит, смешанослойные иллит-сметтит и хлорит-сметтит, каолинит. Определены их структурно-кристаллохимические особенности и количественные соотношения в разрезе (керна 800 см), меняющиеся в соответствии с климатическими циклами и колебаниями уровня озера. Полученные результаты позволили воссоздать историю эволюции водного бассейна оз. Баунт, определяемую климатом региона на протяжении позднего плейстоцена—голоцена. Статья является продолжением серии наших публикаций, посвященных реконструкциям климата голоцена—позднего плейстоцена в Восточной Сибири на основе детальных исследований минерального состава осадочных разрезов небольших озер.

Донные отложения, глинистые минералы, XRD анализ, ИК-спектроскопия, поздний плейстоцен, голоцен, палеоклимат, оз. Баунт, Восточная Сибирь

CLIMATE SIGNALS IN THE LATE QUATERNARY BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE BAUNT (northern Transbaikalia)

P.A. Solotchin, E.P. Solotchina, E.V. Bezrukova, and A.N. Zhdanova

The bottom sediments of lakes with different mineralization located in the basins of inland areas are high-resolution archives of climate and environmental changes. We present results of study of the Late Pleistocene–Holocene sediments of freshwater Lake Baunt, one of the lakes of the Baunt (Tsipa) depression in the permafrost zone in northern Buryatia. The sediments were studied by XRD, IR spectroscopy, laser granulometry, elemental analysis, AMS dating, etc. Mineral analysis of the bottom sediments with an age of ~18 ka has revealed predominant phyllosilicates, quartz, and feldspars. Mathematical modeling of complex XRD spectra made it possible to identify chlorite, muscovite, illite, mixed-layer illite–smectite and chlorite–smectite, and kaolinite among the phyllosilicates. We have determined their structural and crystal-chemical features and quantitative proportions in the section (800 cm long core), which vary in accordance with the climate cycles and lake level fluctuations. The results obtained helped to reconstruct the evolution of the Lake Baunt basin controlled by the regional climate throughout the Late Pleistocene–Holocene. This paper continues a series of our publications concerned with the reconstruction of the Late Pleistocene–Holocene climate in East Siberia by comprehensive studies of the mineral composition of sedimentary sections of small lakes.

Bottom sediments, clay minerals, XRD analysis, IR spectroscopy, Late Pleistocene, Holocene, paleoclimate, Lake Baunt, East Siberia

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на значительно возросшее в последнее десятилетие число публикаций, посвященных исследованиям климата Сибири в позднечетвертичное время, проблема построения единой палеоклиматической модели для данного региона еще далека до окончательного разрешения. Во многом это объ-

ясняется разнообразием ландшафтов и особенностями локальной атмосферной циркуляции, характерными для внутриконтинентальных областей [Andreev et al., 2004; Базарова и др., 2008; Безрукова и др., 2008, 2011, 2017; Tarasov et al., 2009; Решетова и др., 2013; Птицын и др., 2014; Хазин и др., 2016; и др.]. Изучение новых объектов, могущих служить источниками информации об изменениях регионального климата, является актуальной научной задачей. К числу таких объектов относятся донные отложения мелководных озер различной минерализации, небольшие размеры которых предопределяют исключительную чувствительность к климатическим изменениям [Last, 2002; Last, Ginn, 2005; Deocampo, 2010; Скляров и др., 2010а,б; Bertoni, 2011; Солотчина и др., 2014, 2015, 2017, 2018; Страховенко и др., 2015; Федотов и др., 2016; Солотчин и др., 2017]. В связи с резкими изменениями климата на планете и неопределенностью его прогностических моделей, осадочные летописи позднего плейстоцена—голоцена представляют особый интерес, поскольку климатические обстановки в указанное время неоднократно менялись. При этом они могли быть как близкими к современным условиям, так и являться возможными аналогами климата будущего. Кроме того, отложения этого возраста, как правило, не подвергались глубоким постседиментационным преобразованиям.

Важнейшая информация содержится в минералого-кристаллохимических характеристиках осаждающихся фаз, поскольку их состав и структура непосредственным образом зависят не только от состава пород водосбора, но и от химизма озерных вод, солености, температуры и биологической продуктивности палеобассейна, которые, в свою очередь, контролируются климатом региона. В исследованиях мы опираемся на авторский подход к палеоклиматическим реконструкциям, в основе которого лежат детальные минералого-кристаллохимические исследования озерных осадков. Основная часть наших предыдущих публикаций посвящена изучению донных осадков мелководных солоноватых и соленых озер, приуроченных к территориям с господством аридных и семиаридных климатических обстановок [Скляров и др., 2010а,б; Солотчина, Солотчин, 2014; Солотчина и др., 2014, 2015, 2017, 2018; Солотчин и др., 2017]. В результате проведенных минералого-кристаллохимических исследований установлено, что в этих озерах основными носителями палеоклиматической информации являются аутигенные карбонатные минералы кальцит-доломитового ряда.

На территории Восточной Сибири широко распространены пресноводные бассейны, в которых на протяжении позднечетвертичного времени не происходило осаждение карбонатов. Тем не менее отложения таких водоемов также могут служить источником информации для палеоклиматических реконструкций. Роль минералов-индикаторов в них могут исполнять слоистые силикаты — распространенные компоненты озерных отложений. Ассоциации, состав, структура, типоморфные особенности глинистых минералов отражают физико-химические обстановки выветривания и переноса вещества и позволяют восстанавливать ландшафтно-палеогеографические, палеоклиматические, палеотектонические условия, в которых осуществлялись процессы седиментации в конечных водоемах стока [Страхов и др., 1954; Лидер, 1986; Дриц, Коссовская, 1990, 1991; Япаскурт, 2008; Deocampo, 2015].

Целью нашей работы является изучение реакции минерального состава донных осадков бескарбонатных пресных озер Байкальского региона (на примере оз. Баунт) на изменения природной среды и климата в позднем плейстоцене и голоцене. Немаловажным обстоятельством, определяющим актуальность предлагаемого исследования, является то, что по сравнению с озерами центральных и южных областей Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) бассейны северных районов изучены в очень малой степени [Федотов и др., 2016; Безрукова и др., 2017]. Что же касается детального литолого-минералогического анализа донных осадков озер севера БРЗ, то здесь данных вообще исчезающе мало.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Озеро Баунт расположено на северо-востоке Республики Бурятия в западной части Баунтовской котловины (Ципинская впадина). Баунтовская котловина относится к байкальскому типу и в тектоническом плане является частью Байкальской рифтовой зоны [Щетников, 2007]. Ее дно приподнято на высоту около 1000—1100 м над уровнем моря, с севера котловина обрамляется Южно-Муйским хребтом, с юга и юго-востока — горами Малый Хаптон и Бабанты. Озеро принадлежит Ципо-Ципиканской системе озер, относящейся к бассейну р. Витим (рис. 1). Оно довольно большое, площадь водного зеркала составляет 111 км², протяженность (с юго-запада на северо-восток) — 17,5 км, максимальная — 19 км, ширина — около 9 км, средняя глубина 17 м, максимальная — 33 м, площадь водосборного бассейна — 10 300 км². Объем воды составляет ~1,9 км³. Озеро имеет форму треугольника со сглаженными краями, его основание вытянуто с юго-запада на северо-восток, как и вся Ципинская впадина (см. рис. 1, врезка). В озеро Баунт впадают две сравнительно крупные реки — Верхняя Ципа и Ципикан, а также ряд мелких водотоков, вытекает — Нижняя Ципа. Берега высокие, на северо-западе скальные, обрывистые, в междуречье Нижней Ципы и Ципикана заболоченные. Озеро находится в зоне сплошной многолетней мерзлоты, нижняя граница которой находится на глубине 100—250 м, мощность деятельного слоя может составлять до 2 м.

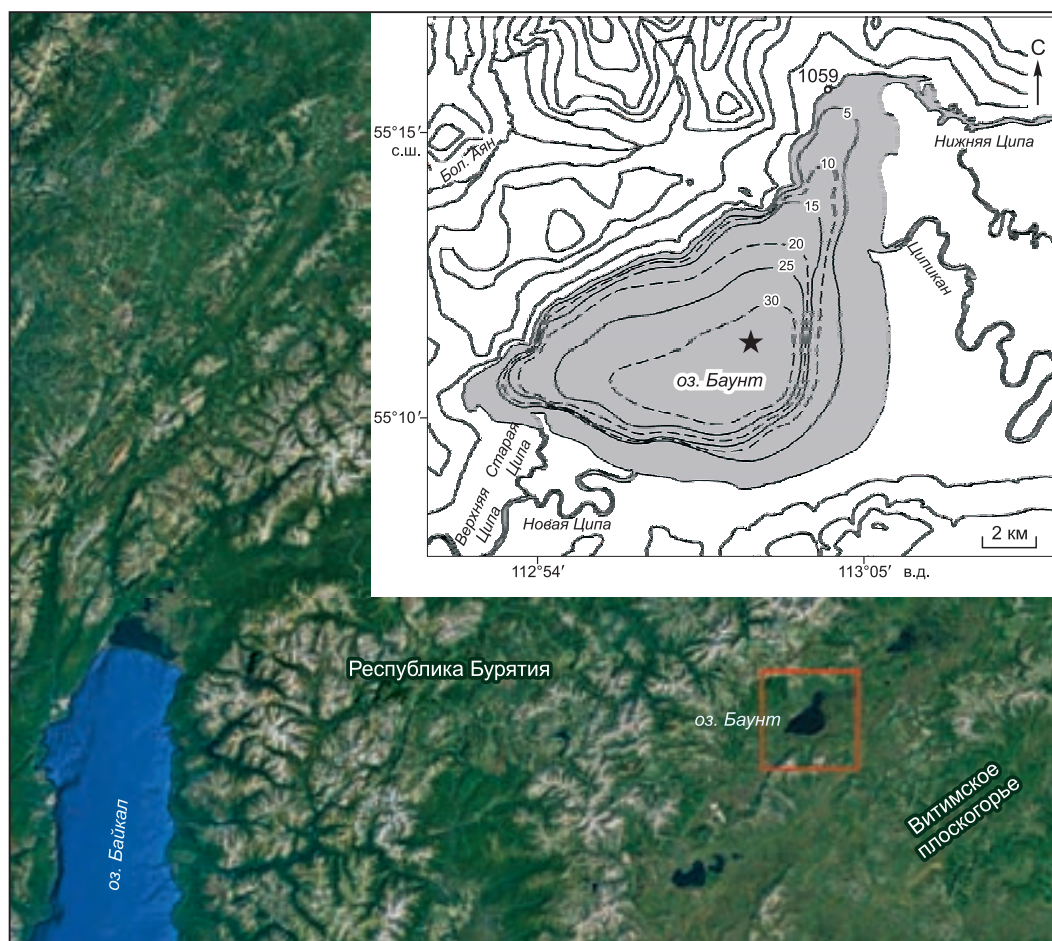


Рис. 1. Расположение оз. Баунт на территории Республики Бурятия в системе Ципо-Ципиканских озер.

На врезке звездочкой помечена точка бурения керна в центре озера [Крайнов и др., 2017].

Климат района резко континентальный, с большими колебаниями сезонных и суточных температур. В июле в отдельные дни воздух может прогреваться до $+35^{\circ}\text{C}$, в январе температура может опускаться до -50°C . Среднегодовое количество осадков составляет $\sim 350\text{—}400$ мм с максимумом в летние месяцы и начале осени. В водном балансе озера помимо речного притока и сброса значительную роль играет снеговое и дождевое питание с преобладанием снегового. Снежный покров начинает формироваться в конце октября—начале ноября, а сходит в начале апреля. Для озера характерны значительные колебания уровня вод (до 3.5 м). Подъем уровня начинается в конце весны и совпадает с таянием снегов. Максимальные уровни отмечаются летом, когда к снеговому добавляется дождевое питание, поскольку на этот период приходится максимум осадков. Воды оз. Баунт пресные (общая минерализация < 250 мг/л, величина pH колеблется от 6.80 до 7.25) относятся к гидрокарбонатным кальциевым, ионный состав вод приведен в табл. 1. То, что приповерхностные воды имеют большую минерализацию, нежели глубинные, указывает на их интенсивный прогрев и некоторое превышение испарения над притоком. При этом повышенная температура, снижающая плотность, препятствует погружению более минерализованных вод в глубь водоема.

Таблица 1. Современный ионно-солевой состав вод оз. Баунт

Глубина, м	pH	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	F ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	TDS
		мг/л								
1.82	7.25	131.8	14.0	4.25	1.8	10.58	0.74	1.82	38.08	223.82
20.0	6.8	51.26	4.0	1.77	0.28	1.63	0.82	1.58	13.43	85.52

Первые исследования донных осадков оз. Баунт для реконструкции природной среды и климата голоцена на северо-востоке Республики Бурятия были предприняты в 2013 г. Был получен керн Бнт-13 длиной 143 см и возрастом осадков в забое ~ 7000 лет. Результаты геохимического и палинологического анализов донных отложений позволили получить сведения об изменении природной среды и климата в постоптимальное голоценовое время [Амосова и др., 2017; Безрукова и др., 2017]. В 2014 г. было осуществлено бурение донных отложений (керн Бнт-14) в наиболее глубокой точке (33 м) котловины озера (см. рис. 1, врезка). Бурение было проведено со льда керноотборным устройством ударно-канатного типа UWITEC (Австрия). Координаты точки бурения: 55°11'15" с.ш., 113°01'45" в.д. Мощность вскрытых осадков составляет 13.7 м, возраст оценивается в 28—30 тыс. лет [Крайнов и др., 2017]. Результаты палеомагнитных и петромагнитных исследований материала керна представлены в работе М.А. Крайнова с соавторами. Однако, как указывают сами авторы, «вопрос связи между геомагнитным полем и климатическими изменениями, между петромагнитными характеристиками донных отложений озер и климатом пока остается нерешенным» [Крайнов и др., 2017, с. 1774]. Таким образом, поиск надежных палеоклиматических маркеров в позднелейстоцен-голоценовых отложениях оз. Баунт является актуальной исследовательской задачей.

Объектом наших исследований послужили осадки керна Бнт-14 до глубины 800 см, интервал опробования составил 5 см. В общей сложности было проанализировано 142 образца. Трудность поставленной задачи обусловлена сложным составом осадков, содержащих минеральные и биогенные компоненты в широком диапазоне концентраций. Литолого-минералогическое изучение образцов проводилось комплексом методов, включающим рентгеновскую дифрактометрию (XRD), ИК-спектроскопию, лазерную гранулометрию и рентгенофлуоресцентный анализ в «ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН» Института геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск. Ведущая роль в идентификации, кристаллохимической типизации, изучении тонких особенностей реальной структуры дисперсных, большей частью плохо окристаллизованных слоистых силикатов осадка — слюдов, хлоритов, смектитов, смешанослойных и каолиновых минералов — принадлежит порошковой рентгеновской дифрактометрии. Качественно новый уровень исследований был обеспечен применением авторского эффективного метода математического моделирования сложных рентгеновских дифракционных профилей слоистых силикатов [Solotchina et al., 2002, 2009; Солотчина, 2009]. Рентгеновские исследования выполнены на дифрактометре ARL X'TRA (излучение CuK_α). Для фазового анализа образцы были отсканированы в интервале от 2 до 65° (2 Θ) с шагом 0.05° и временем сканирования в точке 3 с. Для моделирования XRD профилей глинистых минералов насыщенные этиленгликолем образцы были отсканированы в интервале от 2 до 35° (2 Θ), с шагом 0.05° и временем сканирования в точке 32 с. ИК-спектры были записаны на спектрометре VERTEX 70 FT I. Образцы готовились методом прессования таблеток с KBr. Гранулометрический анализ терригенного компонента осадков проводился на лазерном микроанализаторе частиц Analysette 22. Химический состав образцов определялся на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP. Определение возраста осадков проводилось в радиоуглеродной лаборатории г. Познань (Польша). Были получены четыре AMS¹⁴C датировки по органическому веществу с глубин 200, 400, 600, 800 см. Измеренные значения были приведены в соответствие с календарным возрастом с использованием калибровочной кривой INTCAL 13 [Reimer et al., 2013]. Калиброванный возраст рассчитывался по программе OxCal 4.2 [Ramsey, 2009].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изученный разрез донных отложений оз. Баунт имеет выраженное двучленное строение (рис. 2). В интервале 0—540 см залегают диатомовые илы с различным содержанием алевритового материала, текстура осадков массивная. Отмечается примесь углефицированного растительного детрита. В нижней части разреза (540—800 см) преобладают глинисто-алевритовые отложения с небольшой примесью песка. По всей длине интервала встречаются створки диатомей в переменных количествах. Среди текстур отмечаются массивная, косослоистая, пятнистая; неоднородность обусловлена изменениями размерности частиц.

Возраст изученной толщи донных отложений [Крайнов и др., 2017] составляет ~ 18 150 кал. л.н. (14 930 л.н. ¹⁴C), охватывая, таким образом, весь голоцен и конец позднего плейстоцена (см. рис. 2). Расчленение голоценовой части разреза выполнено в соответствии со шкалой Блитта—Сернандера. Позднелейстоценовый интервал (11700—18150 кал. л.н.) включает отложения позднего дриаса, нерасчлененного беллинга—аллереда, древнейшего дриаса и, возможно, очень маломощный слой осадков конца последнего ледникового максимума (LGM). Границы данных подразделений проведены согласно схеме, предложенной Н. Робертсом [Roberts, 1998].

В минеральном составе донных осадков оз. Баунт преобладают слоистые силикаты, присутствуют полевые шпаты (преимущественно плагиоклаз с примесью калиевого полевого шпата), кварц, следы

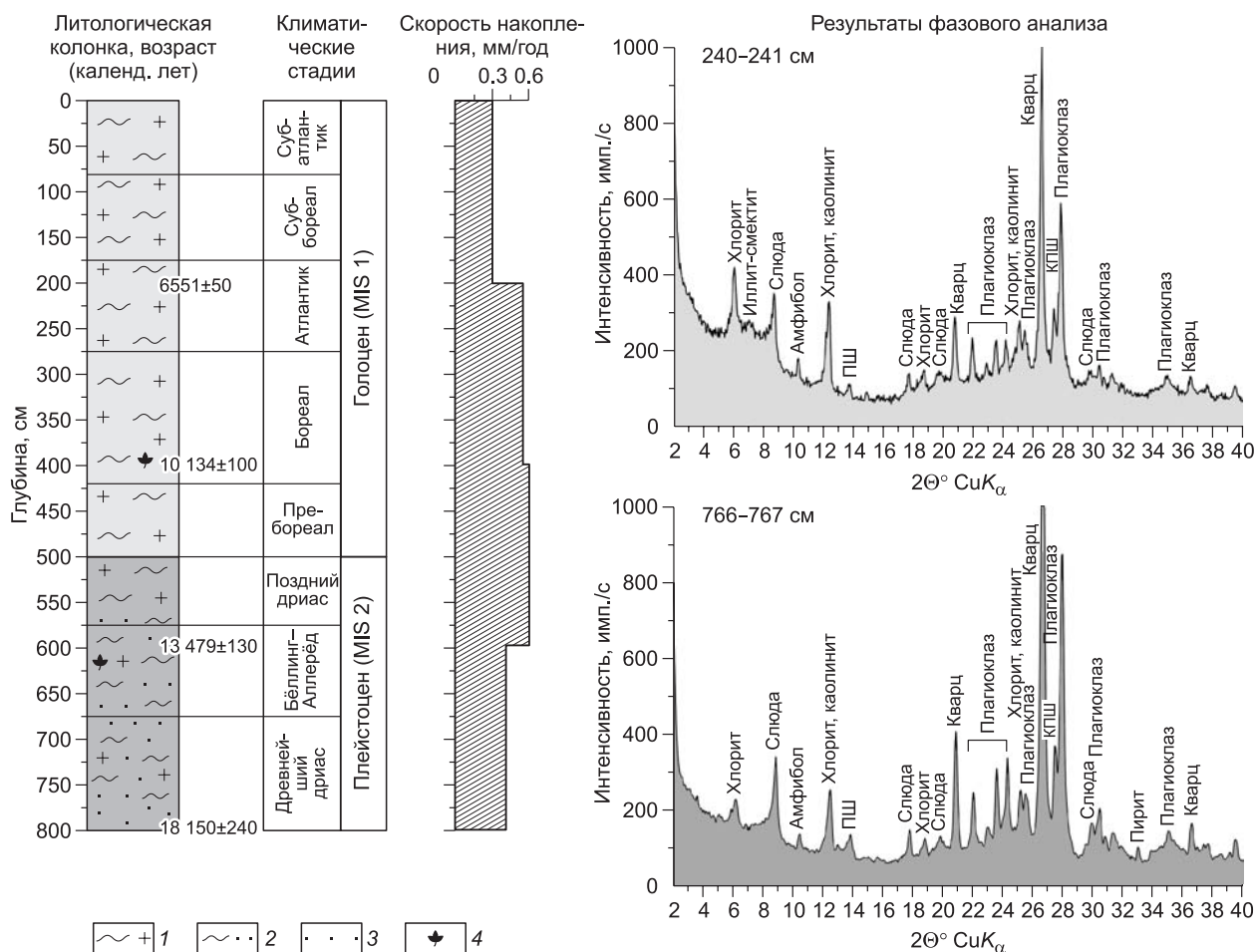


Рис. 2. ЛитоLOGическая колонка позднеплейстоцен-голоценового осадочного разреза оз. Баунт, возрастная модель, скорости осадконакопления, дифракционные спектры образцов осадков с глубин 240—241 см (атлантический период) и 766—767 см (древнейший дриас).

1 — диатомовый ил, 2 — алевритоглинистый осадок, 3 — алеврит, 4 — растительный детрит.

амфибола и изредка пирита. По данным XRD анализа и ИК-спектроскопии, на протяжении всего разреза, за исключением его нижнего горизонта (700—800 см), доля слоистых силикатов достигает 60—65 % от общего состава пробы, биогенный кремнезем установлен в переменных количествах (5—30 %). Фрагмент дифрактограммы образца из верхнего горизонта разреза (гл. 240—241 см, атлантический период) приведен на рис. 2. В низах разреза (древнейший дриас) содержание слоистых силикатов не превышает ~50 %, биогенный кремнезем практически отсутствует (<5 %), возрастает роль кварца, полевых шпатов (см. рис. 2, гл. 766—767 см). Необходимо подчеркнуть, что дифрактограммы и ИК-спектры образцов вплоть до отложений древнейшего дриаса (интервал ~700—800 см) мало отличаются между собой и не показывают явной зависимости от климатических изменений в районе расположения озера. Анализ химического состава осадков этого интервала также не выявил существенного разброса концентраций основных породообразующих элементов (табл. 2). Тем не менее отмечаются изменения в малоугловой области XRD спектров, где располагаются диагностические линии слоистых силикатов (рис. 3). Для дифференциальной диагностики слоистых силикатов, включая смешанослойные образования, в многокомпонентных системах был применен авторский метод математического моделирования их рентгеновских дифракционных профилей [Solotchina et al., 2002, 2009; Солотчина, 2009], базирующийся на расчете интерференционной функции от одномерно-неупорядоченных кристаллов конечной толщины [MacEwan, 1958; Reynolds, 1980]. Модельный алгоритм включает фитинг теоретических кривых к наблюдаемым и оптимизацию трех групп модельных параметров (химический состав минералов, вероятностные параметры, размеры доменов) эффективным нелинейным программированием [Gill et al., 1981]. Анализировались исходные нефракционированные пробы. Фон был аппроксимирован на основе

Таблица 2.

Химический состав (мас. %) донных осадков оз. Баунт

Компо- нент	Голоцен MIS1							Верхний плейстоцен MIS2					
	Субатлан- тик*		Суб- бореал	Атлантик		Бореал	Пребо- реал	Поздний дриас		Беллинг—аллеред		Древнейший дриас	
	Глубина, см												
	47–48	77–78	143–144	210–211	276–277	336–337	444–445	516–517	569–570	643–644	669–670	751–752	766–767
SiO ₂	55.94	55.48	56.89	56.96	57.88	54.81	53.51	52.15	55.83	56.23	54.44	57.02	57.80
TiO ₂	0.57	0.56	0.51	0.48	0.52	0.58	0.66	0.63	0.56	0.62	0.63	0.61	0.67
Al ₂ O ₃	14.04	13.86	12.42	11.97	13.12	14.57	16.31	15.74	14.00	15.19	15.49	15.37	16.01
Fe ₂ O ₃	8.59	8.40	9.18	9.34	8.02	8.82	8.94	9.61	8.50	8.20	9.39	7.78	7.02
MnO	0.61	0.37	0.45	0.11	0.32	0.30	0.25	0.29	0.43	0.24	0.22	0.21	0.16
MgO	1.63	1.58	1.46	1.39	1.53	1.76	1.92	1.87	1.63	1.89	2.04	1.92	2.13
CaO	1.60	1.52	1.43	1.42	1.50	1.48	1.57	1.51	1.53	1.50	1.46	1.56	1.80
Na ₂ O	1.78	1.74	1.56	1.47	1.65	1.75	2.01	1.86	1.76	1.89	1.68	2.00	2.30
K ₂ O	2.07	2.10	1.89	1.80	2.01	2.24	2.56	2.42	2.18	2.55	2.42	2.60	2.73
P ₂ O ₅	0.35	0.30	0.40	0.48	0.32	0.32	0.23	0.43	0.34	0.44	0.40	0.43	0.28
BaO	0.11	0.11	0.10	0.09	0.10	0.11	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11	0.13
SO ₃	0.05	0.04	<0.03	0.03	<0.03	0.05	0.06	0.04	0.04	0.03	0.05	0.06	0.03
V ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
NiO	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
П.п.п.	12.36	13.44	13.13	14.21	12.07	12.52	11.64	12.40	12.31	10.10	11.69	9.85	8.04
Сумма	99.80	99.58	99.52	99.84	99.15	99.39	99.84	99.14	99.28	99.08	100.10	99.59	99.16

* Стадия.

XRD профиля чистого кварца. Вклад аморфного биогенного кремнезема (SiO_{2 bio}) был оценен на основе наших предшествующих калибровок XRD профилей образцов чистых диатомовых водорослей оз. Байкал, проанализированных при тех же экспериментальных условиях. Количество биогенного кремнезема было оценено по ИК-спектрам. Для коррекции «провисания» общего модельного спектра слоистых фаз линии присутствующих неслоистых минералов описывались функцией Пирсона VII (переменными являются интенсивность линии, полуширина и параметр формы). Гало от рентгеноаморфных фаз (в том числе SiO_{2 bio}) добавлялось в модельный профиль в пропорции, соответствующей их содержанию в образце по данным ИК-спектроскопии. Моделированием XRD профилей слоистых силикатов были установлены их количественные и структурные характеристики (см. рис. 3, табл. 3).

Как видно из табл. 3, слоистые силикаты, сумма которых в образце при моделировании принимается за 100 %, сложены мусковитом, иллитом, смешанослойными иллит-сметитами и хлорит-сметитами, 14Å-хлоритом, каолинитом. Количество хорошо окристаллизованного мусковита с высоким содержанием калия в структуре (K = 0.9 ф. ед.) и крупными размерами доменов (30—34 слоя) изменяется в образцах очень сильно — от 53.2 % (древнейший дриас) до 22.1 % (атлантик), т. е. более чем в 2 раза. Содержание в осадках тонкодисперсного иллита с размерами доменов 7—8 слоев и с повышенной концентрацией Fe в структуре (0.5 ф. ед.) на протяжении разреза варьирует слабо (от 25.4 до 17.8 %). Наиболее изменчиво содержание в осадке смешанослойных иллит-сметитов: от 22.3 до 3.9 % от суммы слоистых силикатов. Количество сметитовых межслоев в их структуре меняется от 20 % (древнейший дриас) до 40 % (атлантик и беллинг—аллеред), размер доменов — от 9 до 5 слоев. В отложениях присутствуют хлорит (2.8—12.5 %) с крупными доменами (19—29 слоев) и тонкодисперсный смешанослойный хлорит-сметит, содержание которого меняется в довольно широких пределах — от 7.6 % в подошве разреза до 22.4 % в его кровле. Размер доменов составляет ~ 5—11 слоев, что более чем в 2 раза меньше, чем у хлорита. Кроме того, в образцах постоянно присутствует небольшая примесь каолинита (около 5 %), количество которого вносится в суммарный модельный профиль в соответствии с данными ИК-спектроскопии.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изучение динамики процессов накопления позднеплейстоцен-голоценовых отложений оз. Баунт показало, что наиболее активная седиментация (скорость осадконакопления достигает ~0.6 мм/год) началась во время потепления беллинг—аллеред (см. рис. 2). Это обстоятельство, по нашему мнению, связано с интенсивным таянием ледников и увеличением сноса с горного обрамления Баунтовской кот-

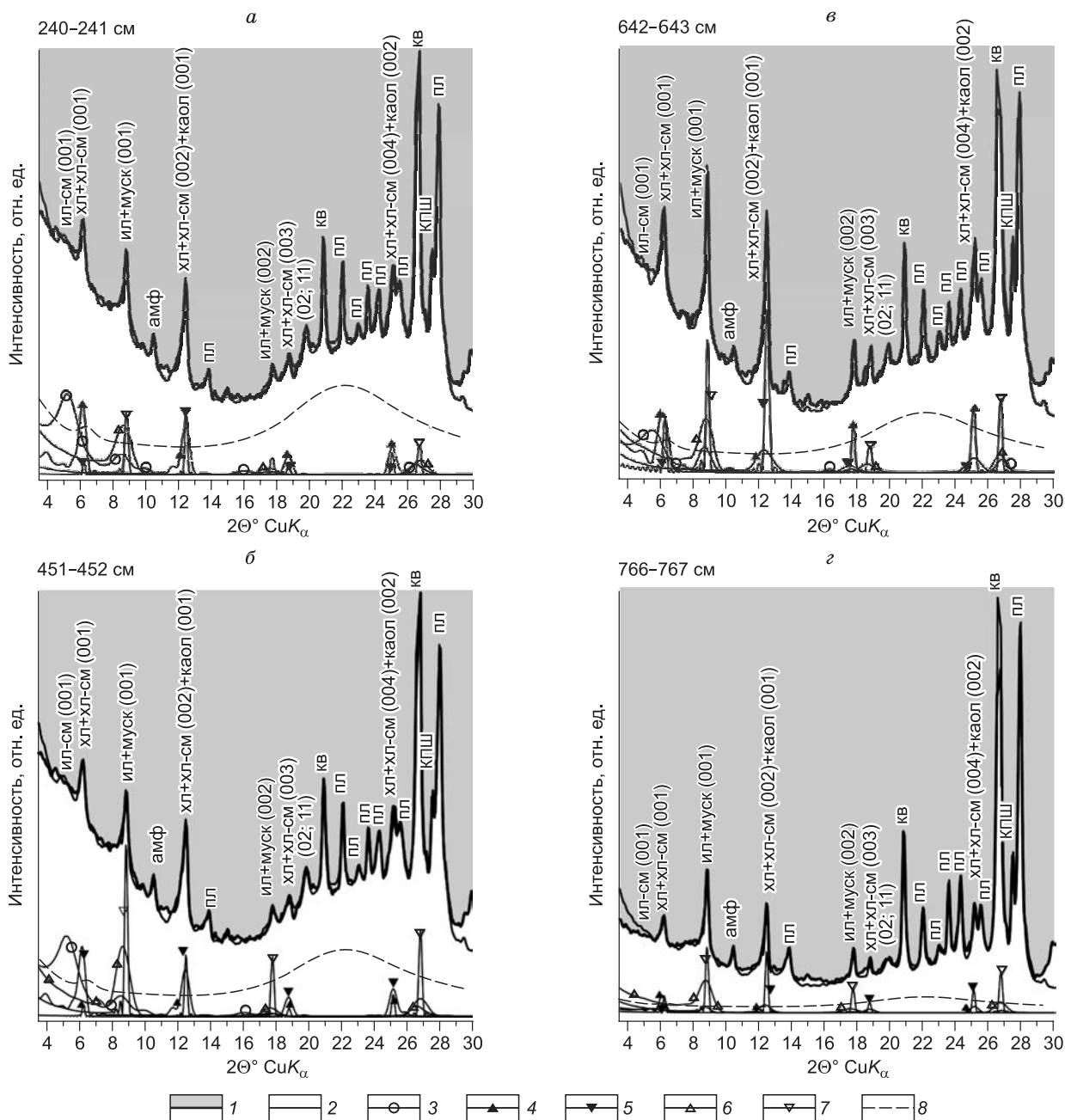


Рис. 3. Результаты моделирования рентгеновских дифракционных профилей донных осадков оз. Байкал:

a — атлантический период; *б* — пребореальный период; *в* — беллинг-аллеред; *г* — древнейший дриас. Содержания отдельных компонентов см. в табл. 3. 1 — эксперимент, 2 — модель, 3 — иллит-сметтит, 4 — хлорит-сметтит, 5 — хлорит, 6 — иллит, 7 — мусковит, 8 — $\text{SiO}_{2\text{bio}}$ + рентгеноаморфная компонента.

ловины. Подобные скорости осадконакопления выдерживались до начала бореального периода, что свидетельствует, во-первых, о господстве в регионе на протяжении более чем 3000 лет сравнительно влажного климата и, во-вторых, о том, что переход плейстоцен/голоцен (MIS2/MIS1) был плавным, без резких катастрофических климатических событий. На этот факт указывает также и постепенное замещение глинисто-алевритовых отложений стадии MIS2 диатомовыми илами стадии MIS1. Тем не менее нельзя отрицать возможные флуктуации температурного фона на отрезке беллинг—аллеред — начало бореала, так как поздний дриас в Байкальском регионе рассматривается как интервал значительного похолодания [Prokopenko et al., 1999]. В дальнейшем темпы осадконакопления начинают постепенно снижаться, достигая среднего расчетного значения ~ 0.3 мм/год в конце атлантического периода (см. рис. 2).

Таблица 3. Количественные и структурные характеристики основных компонентов ассоциации глинистых минералов в осадках оз. Баунт (по данным моделирования XRD профилей)

Слоистые силикаты	Голоцен MIS1		Верхний плейстоцен MIS2	
	Атлантик	Пребореал	Беллинг-аллеред	Древнейший дриас
	240–241*	451–452	642–643	766–767
Иллит-смектит, %	22.3	12.7	17.7	3.9
Кол-во смектитовых межслоев, %	40	30	40	20
Содержание К, ф. ед.	0.3	0.4	0.2	0.4
Fe, ф. ед.	0.3	0.4	0.4	0.4
Средний размер доменов	5	8	7	9
Иллит, %	25.4	19.0	21.2	17.8
Кол-во иллитовых межслоев, %	95	94	98	94
Содержание К, ф. ед.	0.3	0.4	0.4	0.4
Fe, ф. ед.	0.5	0.5	0.5	0.5
Средний размер доменов	7	8	7	8
Мусковит, %	22.1	39.8	32.2	53.2
Содержание К, ф. ед.	0.9	0.9	0.9	1.0
Fe, ф. ед.	0.1	0.1	0.0	0.0
Средний размер доменов	30	33	34	33
Хлорит, %	2.8	12.0	8.7	12.5
Содержание Fe, ф. ед.	2.5	2.0	1.5	2.0
Средний размер доменов	29	20	19	29
Хлорит-смектит, %	22.4	11.5	15.2	7.6
Кол-во хлоритовых межслоев, %	95	98	98	98
Содержание Fe, ф. ед.	0.9	1.0	1.0	0.8
Средний размер доменов	11	5	7	10
Каолинит, %	5.0	5.0	5.0	5.0

Примечание. ф.ед. — формульная единица.

*Глубина, см.

Такое падение скорости седиментации согласуется с данными об относительной сухости климата на территории Баунтовского района в интервале 7000—6000 л.н. по результатам изучения пылицы древесных растений в отложениях, вскрытых ранее керном Бнт-13 [Безрукова и др., 2017]. Наши исследования отложений оз. Арахлей [Солотчина и др., 2018] показали, что распространение *Pinus sylvestris* в Беклемишевской впадине (Центральное Забайкалье) находится в согласии с ее экспансией на всей территории бассейна оз. Байкал ~7000—6000 л.н. и рассматривается как важнейший региональный палеоэкологический рубеж голоцена [Demske et al., 2005; Tarasov et al., 2009], обусловленный перестройкой атмосферной циркуляции в это время. В глобальном масштабе указанный временной интервал характеризуется высоким уровнем летней инсоляции в этих широтах Северного полушария, активным летним Азиатским муссоном и относительно высокими температурами. Чередование периодов иссушения/увлажнения в изучаемом регионе подтверждается некоторыми геохимическими показателями, предложенными в работе [Engstrom, Wright, 1984]. Так, например, отношение $(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})/\text{SiO}_2$ демонстрирует максимум в пребореальном периоде (0.067, повышенная гумидность), минимум — в атлантическом (0.05, повышенная аридность) и новый рост до 0.06 к середине субатлантического периода. Близкую динамику показывает и отношение $(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Fe}_2\text{O}_3$, максимальные значения которого 0.40 приходятся на пребореальный период, минимальные 0.31 — на атлантический.

Детальные минералого-кристаллохимические исследования осадков пресноводного озера, расположенного в зоне сплошной многолетней мерзлоты, позволили сделать ряд выводов об эволюции природной среды и климата Северного Забайкалья в позднечетвертичное время. Применение метода моделирования одномерных XRD профилей слоистых силикатов раскрыло их важные индикаторные свойства (см. рис. 3, табл. 3). Подобный подход был успешно применен нами ранее для палеоклиматических реконструкций при изучении осадков оз. Байкал в рамках проекта «Baikal Drilling Project» [Кузьмин и др., 2001; Солотчина, 2009; Solotchina et al., 2009].

Дифракционная линия слюды (10 Å) в изученных образцах осадков оз. Баунт не может быть смоделирована одним компонентом, модели последовательно указывают на присутствие двух разновидностей слюды, которые мы описываем как две различные минеральные фазы (см. рис. 3). Одна — хорошо окристаллизованная диоктаэдрическая слюда — характеризуется узкими дифракционными пиками 001, мы идентифицируем ее как мусковит — самый стойкий к выветриванию слоистый силикат [Velde, 1995], и считаем обломочной. Другая — тонкодисперсная фаза — формирует широкое основание дифракционных линий слюды. Она идентифицируется нами как иллит [Bailey et al., 1984], генезис которого

вторичен, вероятнее всего, иллит формируется в почвах в результате выветривания главным образом калиевого полевого шпата [Środoń, 2004]. Подобная геометрия XRD профиля наблюдается для хлорита, дифракционные линии которого также обладают чрезмерной шириной в области низкой интенсивности (см. рис. 3). Вполне возможно, что хлорит формируется в коренных породах питающих провинций в результате разложения крайне неустойчивого в зоне гипергенеза биотита. Чтобы воссоздать эту характерную геометрию профиля хлорита, в дополнение к хорошо окристаллизованной фазе, моделирование предлагает присутствие тонкодисперсной минеральной фазы, близкой хлориту с 2—5 % разбухающих смектитовых межслоев. Этот компонент мы идентифицируем как «хлорит-смектит». По мнению ряда исследователей, тонкодисперсный смешанослойный хлорит-смектит является продуктом деградации первичных биотита, хлорита и других мафических минералов [Chamley, 1989]. Относительно генезиса хлорит-смектита можно высказать предположение, что минерал является представителем ряда разложения биотита в породах обрамления озера: биотит → биотит-вермикулит → вермикулит → хлорит → хлорит-смектит.

Дисперсный смешанослойный иллит-смектит, представленный неупорядоченными разностями, присутствует в отложениях на протяжении всего разреза, однако меняется не только его содержание, но и число смектитовых межслоев в структуре в зависимости от изменения климата (см. табл. 3). Ранее при изучении байкальских осадков нами было установлено, что главным показателем климатических условий на территории водосборного бассейна озера является «индекс смектитовых слоев» — концентрация смектитовых слоев в иллит-смектите [Солотчина, 2009; Solotchina et al., 2009]. В осадках оз. Баунт в холодные периоды (пребореал и древнейший дриас) содержание иллит-смектита уменьшается, также уменьшается количество смектитовых слоев в нем по сравнению с теплыми периодами (атлантик и беллинг—аллеред) (см. табл. 3). Поведение мусковита в разрезе также демонстрирует четкую корреляцию с климатическими циклами. Его содержание в осадках холодных периодов резко возрастает на фоне падения содержания тонкодисперсных глинистых минералов, что указывает на поступление в осадок с водосбора обломков слабоизмененных пород и, соответственно, преобладание физического выветривания над химическим. Подтверждением этого положения является увеличение содержания в осадках холодных периодов обломочных кварца и плагиоклаза (см. рис. 2). Результаты наших исследований показали, что ассоциация слоистых силикатов остается неизменной на протяжении всего разреза, поэтому интерпретацию климатических сигналов мы основываем на различиях в содержании и структуре индивидуальных фаз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые для северной части Забайкалья получена климатическая летопись позднего плейстоцена—голоцена, основанная на результатах детального литолого-минералогического изучения донных отложений пресноводного оз. Баунт, расположенного в зоне сплошной многолетней мерзлоты. Мощность изученного разреза составила 800 см, возраст основания разреза — около 18000 кал. лет. Верхняя часть изученной толщи сложена диатомовыми илами, а нижняя — преимущественно глинисто-алевритовым материалом. Установлено, что в минеральном составе отложений оз. Баунт преобладают слоистые силикаты, кварц, полевые шпаты. Основными индикаторами климатических изменений являются количественные соотношения слоистых силикатов в разрезе и их структурно-кристаллохимические характеристики. Периоды потепления (атлантик, беллинг—аллеред) характеризуются повышенными содержаниями тонкодисперсного иллит-смектита с высоким содержанием смектитовых слоев, иллита и хлорит-смектита. Напротив, в осадках периодов похолодания (пребореал, древнейший дриас) на фоне усиления процессов физического выветривания отмечены высокие содержания хорошо окристаллизованного обломочного мусковита, хлорита, а также кварца и полевых шпатов. В структуре иллит-смектитов повышается содержание иллитовых слоев (до 80 %). Результаты минералогического изучения осадков находятся в полном соответствии с поведением в разрезе ряда геохимических показателей, а также с данными палинологического анализа высокого временного разрешения, выполненного ранее на материале отложений оз. Баунт, вскрытых керном Бнт-13 [Безрукова и др., 2017]. Проведенные исследования позволили воссоздать историю эволюции водного бассейна оз. Баунт, определяемую климатом региона на протяжении позднего плейстоцена—голоцена.

Авторы благодарят сотрудников ИГХ СО РАН М.А. Крайнова, Е.В. Иванова и ИЗК СО РАН А.А. Щетникова, И.А. Филинова за проведение в 2014 г. буровых работ на оз. Баунт. Основная часть аналитических исследований выполнена в «ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН» Института геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск. Также авторы выражают признательность В.Д. Страховенко (ИГМ СО РАН) и В.А. Бычинскому (ИГХ СО РАН) за ряд конструктивных замечаний, сделанных при рецензировании статьи.

Работа выполнена по государственным заданиям ИГМ СО РАН и ИГХ СО РАН, а также в соответствии с интеграционным проектом СО РАН № 0341-2016-001, при поддержке РФФИ (гранты 18-05-00329, 19-05-00219, 19-05-00328).

ЛИТЕРАТУРА

Амосова А.А., Чубаров В.М., Канева Е.В., Маркова Ю.Н. Определение основных породообразующих элементов, стронция и циркония рентгенофлуоресцентным методом для геохимической характеристики донных отложений // Аналитика и контроль, 2017, т. 21, № 1, с. 16—24.

Базарова В.Б., Мохова Л.М., Климин М.А., Орлова Л.А., Базаров К.Ю. Климатические изменения и обстановки осадконакопления в среднем—позднем голоцене в Юго-Восточном Забайкалье // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (12), с. 1294—1303.

Безрукова Е.В., Кривоногов С.К., Такахара Х., Летунова П.П., Шичи К., Абзаева А.А., Кулагина Н.В., Забелина Ю.С. Озеро Котокель — опорный разрез позднеледниковья и голоцена юга Восточной Сибири // ДАН, 2008, т. 420, № 2, с. 248—253.

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 (6), с. 586—595.

Безрукова Е.В., Амосова А.А., Чубаров В.М., Финкельштейн А.Л., Кулагина Н.В. Изменение природной среды северо-востока Республики Бурятия в постоптимальный период голоцена: первые результаты // Сибирский экологический журнал, 2017, т. 24, № 4, с. 498—511.

Дриц В.А., Коссовская А.Г. Глинистые минералы: смектиты, смешанослойные образования. М., Наука, 1990, 214 с.

Дриц В.А., Коссовская А.Г. Глинистые минералы: слюды, хлориты. М., Наука, 1991, 175 с.

Крайнов М.А., Безрукова Е.В., Кербер Е.В., Левина О.В., Иванов Е.В., Щетников А.А., Филинов И.А. Первые результаты исследования донных отложений оз. Баунт (Северное Забайкалье) // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (11), с. 1764—1776.

Кузьмин М.И., Карабанов Е.Б., Каван Т., Вильямс Д., Бычинский В.А., Кербер Е.В., Кравчинский В.А., Безрукова Е.В., Прокопенко А.А., Гелетий В.Ф., Калмычков Г.В., Горегляд А.В., Антипин В.С., Хомутова М.Ю., Сошина Н.М., Иванов Е.В., Хурсевич Г.К., Ткаченко Л.Л., Солотчина Э.П., Йошида Н., Гвоздков А.Н. Глубокое бурение на Байкале — основные результаты // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (1—2), с. 8—34.

Лидер М. Седиментология. Процессы и продукты. Пер. с англ. М., Мир, 1986, 439 с.

Птицын А.Б., Чу Г., Дарьин А.В., Замана Л.В., Калугин И.А., Решетова С.А. Скорость седиментогенеза в оз. Арахлей (Центральное Забайкалье) по радиогеохимическим и палинологическим данным // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (3), с. 473—480.

Решетова С.А., Безрукова Е.В., Паниззо В., Хендерсон Э., Птицын А.Б., Дарьин А.В., Калугин И.А. Растительность Центрального Забайкалья в позднеледниковье и голоцене // География и природные ресурсы, 2013, т. 34, № 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-Тырма, Западное Прибайкалье // Геология и геофизика, 2010а, т. 51 (3), с. 303—328.

Скляров Е.В., Солотчина Э.П., Вологина Е.Г., Изох О.П., Кулагина Н.В., Орлова Л.А., Склярова О.А., Солотчин П.А., Столповская В.Н., Ухова Н.Н. Климатическая история голоцена Западного Прибайкалья в карбонатной осадочной летописи озера Холбо-Нур // ДАН, 2010б, т. 431, № 5, с. 668—674.

Солотчин П.А., Скляров Е.В., Солотчина Э.П., Маркова Ю.Н. Карбонатная седиментация в малых минеральных озерах Западного Забайкалья: отклик на изменения климата голоцена // ДАН, 2017, т. 473, № 6, с. 703—708.

Солотчина Э.П. Структурный типоморфизм глинистых минералов осадочных разрезов и кор выветривания. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2009, 234 с.

Солотчина Э.П., Солотчин П.А. Состав и структура низкотемпературных природных карбонатов кальцит-доломитового ряда // Журнал структурной химии, 2014, т. 55, № 4, с. 814—820.

Солотчина Э.П., Скляров Е.В., Солотчин П.А., Вологина Е.Г., Склярова О.А. Минералогия и кристаллохимия карбонатов голоценовых осадков озера Киран (Западное Забайкалье): связь с палеоклиматом // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (4), с. 605—618.

Солотчина Э.П., Скляров Е.В., Страховенко В.Д., Солотчин П.А., Склярова О.А. Минералогия и кристаллохимия карбонатов современных осадков малых озер Приольхонья (Байкальский регион) // ДАН, 2015, т. 461, № 5, с. 579—585.

Солотчина Э.П., Складов Е.В., Солотчин П.А., Замана Л.В., Даниленко И.В., Складова О.А., Татков П.Г. Аутигенное карбонатообразование в озерах Еравнинской группы (Западное Забайкалье): отклик на изменения климата голоцена // *Геология и геофизика*, 2017, т. 58 (11), с. 1749—1763.

Солотчина Э.П., Безрукова Е.В., Солотчин П.А., Шток О., Жданова А.Н. Позднеплейстоцен-голоценовое осадконакопление в озерах Центрального Забайкалья как показатель состояния окружающей среды // *Геология и геофизика*, 2018, т. 59 (11), с. 1777—1794.

Страхов Н.М., Бродская Н.Г., Князева Л.М., Разживина А.Н., Ратеев М.А., Сапожников Д.Г., Шишова Е.С. Образование осадков в современных водоемах. М., Изд-во АН СССР, 1954, 791 с.

Страховенко В.Д., Солотчина Э.П., Восель Ю.С., Солотчин П.А. Геохимические факторы аутигенного минералообразования в донных отложениях озер Тажеранской системы (Прибайкалье) // *Геология и геофизика*, 2015, т. 56 (10), с. 1825—1841.

Федотов А.П., Воробьева С.С., Бондаренко Н.А., Томберг И.В., Жученко Н.А., Сезько Н.П., Степанова О.Г., Мельгунов М.С., Иванов В.Г., Железнякова Т.О., Шабурова Н.И., Четкина Л.Г. Влияние природных и антропогенных факторов на развитие удаленных озер Восточной Сибири за последние 200 лет // *Геология и геофизика*, 2016, т. 57 (2), с. 394—410.

Хазин Л.Б., Хазина И.В., Кривоногов С.К., Кузьмин Я.В., Прокопенко А.А., Ви С., Бурр Дж.С. Климатические изменения на юге Западной Сибири в голоцене по результатам анализа ассоциаций остракод // *Геология и геофизика*, 2016, т. 57 (4), с. 729—742.

Щетников А.А. Проблемы морфотектоногенеза озерных котловин (на примере Байкальской рифтовой зоны) // *Тихоокеанская геология*, 2007, т. 26, № 2, с. 18—29.

Япаскурт О.В. Генетическая минералогия и стадийный анализ процессов осадочного породо- и рудообразования. М., ЭСЛАН, 2008, 356 с.

Andreev A.A., Tarasov P.E., Klimanov V.A., Melles M., Lisitsyna O.M., Hubberten H.-W. Vegetation and climate changes around the Lama Lake, Taymyr Peninsula, Russia during the Late Pleistocene and Holocene // *Quat. Int.*, 2004, v. 122, № 1, p. 69—84.

Bailey S.W., Brindley G.W., Fanning D.S., Kodama H., Martin R.T. Report of the Clay Minerals Society Nomenclature Committee for 1982 and 1983 // *Clays Clay Miner.*, 1984, v. 32, p. 239—240.

Bertoni R. Limnology of rivers and lakes // *Limnology. Encyclopedia of life support systems (EOLSS)*, Oxford, UK, Eolss Publishers, 2011, 66 p.

Chamley H. Clay sedimentology. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1989, 623 p.

Demske D., Heumann G., Granoszewski W., Nita M., Mamakowa K., Tarasov P., Oberhänsli 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. 255—279.

Deocampo D.M. The geochemistry of continental carbonates / Eds. A.M. Alonso-Zara, L.H. Tanner // *Carbonates in continental settings. Developments in sedimentology*. Amsterdam, Elsevier, 2010, v. 62, p. 1—60.

Deocampo D.M. Authigenic clay minerals in lacustrine mudstones / Eds. D. Larsen, S.O. Egenhoff, N.S. Fishman // *Paying attention to mudrocks: priceless. Geological Society of America Special Paper 515*. Boulder, CO, USA, Geol. Soc. Am., 2015, p. 49—64.

Engstrom D.R., Wright H.E. Chemical stratigraphy of lake sediments as a record of environmental change / Eds. E.Y. Haworth, J.W.G. Lund // *Lake sediments and environmental history*. Leicester, Leicester University Press, 1984, p. 11—67.

Gill P.E., Murray W., Wright M.H. Practical optimization. London, Academic Press, 1981, 401 p.

Last W.M. Geolimnology of salt lakes // *Geosci. J.*, 2002, v. 6, № 4, p. 347—369.

Last W.M., Ginn F.M. Saline systems of the Great Plains of western Canada: an overview of the limnogeology and paleolimnology // *Saline Systems*, 2005, 1:10, DOI: 10.1186/1746-1448-1-10.

MacEwan D.M.C. Fourier transform methods for studying X-ray scattering from lamellar systems. II: The calculation of X-ray diffraction effects for various types of interstratification // *Kolloid-Zeitschrift*, 1958, v. 156, p. 61—67.

Prokopenko A.A., Williams D.F., Karabanov E.B., Khursevich G.K. Response of Lake Baikal ecosystem to climate forcing and p_{CO_2} change over the last glacial/interglacial transition // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, v. 172, p. 239—253.

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 Ramsey C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Haffidason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughes 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.

Reynolds R.C. Interstratified clay minerals // Crystal structures of clay minerals and their X-Ray identification / Eds. G.W. Brindley, G. Brown. London, Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 1980, p. 249—303.

Roberts N. The Holocene: An environmental history. Malden, Massachusetts, USA, Blackwell Publishers, 1998, 316 p.

Solotchina E.P., Prokopenko A.A., Vasilevsky A.N., Gavshin V.M., Kuzmin M.I., Williams D.F. Simulation of XRD patterns as an optimal technique for studying glacial and interglacial clay mineral associations in bottom sediments of Lake Baikal // Clay Miner., 2002, v. 37, p. 105—119.

Solotchina E.P., Prokopenko A.A., Kuzmin M.I., Solotchin P.A., Zhdanova A.N. Climate signals in sediment mineralogy of Lake Baikal and Lake Hovsgol during the LGM-Holocene transition and the 1-Ma carbonate record from the HDP-04 drill core // Quat. Int., 2009, v. 205, p. 38—52.

Środoń J. Book reviews. Illite, by Alain Meunier and Bruce Velde. Springer // Clays Clay Miner., 2004, v. 52, № 6, p. 792—797.

Tarasov P.E., Bezrukova E.V., Krivonogov S.K. 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.

Velde B. Composition and mineralogy of clay minerals // Origin and mineralogy of clays. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1995, p. 8—42.

*Рекомендована к печати 28 февраля 2020 г.
Е.В. Складовым*

*Поступила в редакцию 27 декабря 2019 г.,
после доработки — 1 февраля 2020 г.*