УДК 549.742:552.143:551.583

МИНЕРАЛОГИЯ ГОЛОЦЕНОВЫХ ОСАДКОВ МАЛЫХ ОЗЕР БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА: СВЯЗЬ С ПАЛЕОКЛИМАТОМ¹

© 2015 г. И.В. Даниленко, П.А. Солотчин, Э.П. Солотчина

Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия; Ira27021980@mail.ru

Поступила в редакцию 02.12.2014 г.

В статье рассмотрены результаты комплексного изучения голоценового терригенно-эвапоритового разреза донных отложений одного из малых соленых озер с карбонатным типом седиментации, расположенного на территории Баргузинской котловины (Республика Бурятия). Исследования проводились с применением широкого спектра методов: рентгеновской дифрактометрии (XRD), ИК-спектроскопии, лазерной гранулометрии, определения стабильных изотопов ¹⁸O и ¹³C и других методик. Методом математического моделирования XRD профилей хемогенных карбонатных минералов установлено, что они представлены кальцитом и низко-Mg кальцитом. Прослежена динамика изменения содержания карбонатов в озерных осадках от подошвы к кровле разреза (от ~4900 л.н. до наших дней). Полученная карбонатная летопись, дополненная результатами других анализов, раскрывает картину эволюции озерного бассейна в голоцене в зависимости от изменений регионального климата и окружающей среды.

Ключевые слова: терригенно-эвапоритовый разрез донных отложений, рентгеновская дифрактометрия, определение стабильных изотопов ¹⁸O и ¹³C, карбонатная летопись, эволюция озерного бассейна, изменения регионального климата.

Введение. Дискуссионность проблемы глобального потепления и неопределенность климатических прогнозов привела к заметному росту палеоклиматических исследований. До сих пор не установлено, каков вклад антропогенного фактора в современное потепление, неясна причина внезапных кратковременных климатических сдвигов и их периодичность, особенно для внутриконтинентальных областей. Весьма актуальными в этой связи представляются исследования климата голоцена, поскольку он является близким аналогом современности и потенциальным аналогом климата будущего. Зарубежные специалисты, занимающиеся палеоклиматическими реконструкциями, уделяют повышенное внимание современным системам малых соленых озер аридных и семиаридных зон [7, 9, 10, 12]. В силу своих небольших размеров и широко проявленных процессов аутигенного минералообразования, приводящих к формированию своеобразных терригенно-эвапоритовых разрезов, эти водоемы фиксируют в своих осадочных летописях даже незначительные изменения

о окружающей природной среды. В нашей стране исследования малых озер с целью проведения палеоклиматических реконструкций немногочисленны и основываются главным образом на данных палинологического, диатомового анализов и распределении макро- и микроэлементов, тогда как минералогический аспект освещен явно недостаточно. Целью работы являлось исследование минеральных ассоциаций донных осадков бессточных мелководных соленых озер, нередко плайевых, располагающихся в засушливых районах Байкальского региона. Особое внимание мы уделили изучению хемогенных карбонатов, поскольку их структурные особенности, закономерности формирования и последовательность осаднения являются объективными показателями прошлых изменений климата и окружающей среды.

Объекты и методы исследований. Объектом исследования послужили осадки озера Большое Алгинское, расположенного на территории Республики Бурятия в Баргузинской впадине – одном из крупнейших водосборных бассейнов Байкальской рифтовой зоны (рис. 1). Климат территории резко континентальный, суровый и засушливый,

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-05-00296а).

Рис. 1. Местоположение озера Большое Алгинское, Республика Бурятия (космоснимок Google Earth). Координаты точки отбора керна: N 53°37.54', E 109°56.47'.

что определяется ее географическим положением в центре Азиатского материка. Баргузинская котловина характеризуется отрицательной среднегодовой температурой воздуха $-4 - -7^{\circ}\text{C}$, что способствует образованию вечной мерзлоты, годовая сумма осадков не превышает 200–250 мм [1]. Озеро Большое Алгинское принадлежит к группе Алгинских озер, питание которых осуществляется за счет разгрузки глубинных гидротерм, связанных с зонами новейших разломов. Оно является бессточным, имеет форму вытянутого прямоугольника, в юго-восточной части соединено небольшим проливом с Малым Алгинским озером. Площадь водного зеркала составляет 1.04 км², глубина около 1.0–1.5 м, общая минерализация вод – 3.26 г/л, рН = 9.5, карбонатная щелочность $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^{-} = 6050$ мг/л. Большое Алгинское озеро относится к сульфатно-гидрокарбонатному натриевому типу, основным источником его питания является Алгинский родник термальных вод. С юго-запада к озеру примыкают болота, в которых берут начало ключи, обеспечивающие устойчивый приток. Воды озера имеют следующий ионный состав (мг/л): Cl^{-} (60), SO_4^{2-} (25690), $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$ (15700), Mg^{2+} (20), Ca^{2+} (170). [2].

Для изучения донных осадков использовался следующий комплекс методов: рентгеновская дифрактометрия (XRD), ИК-спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия, лазерная гранулометрия, анализ стабильных изотопов $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$, РФА СИ и атомная абсорбция. Возраст осадков определялся методом ускорительной масс-спектрометрии AMS (^{14}C) по карбонатному материалу. Качественно новый уровень исследований обеспечен применением современных методов математической обработки XRD профилей [4].

Результаты. Осадочный разрез (длина керна 75 см) вскрыт в центральной части акватории водоема в феврале 2010 г. методом бурения с поверхности льда (рис. 2). Верхние 20 см отложений представлены влажным мягким осадком, сложенным алевритом и пелитом с незначительной примесью песка. Биогенная компонента включает в себя многочисленные створки диатомей, раковины гастропод и растительные остатки. Ниже по разрезу, как показывают результаты лазерного гранулометрического анализа, размерность осадка в целом увеличивается, возрастает содержание алевритовой и псаммитовой фракций; песчаный материал распределен в отложениях как равно-

Рис. 2. Литологическая колонка отложений озера Большое Алгинское, возраст (^{14}C), распределения карбонатов и стабильных изотопов.

1 – пелит, 2 – алевроит, 3 – псаммит, 4 – диатомеи, 5 – растительные остатки, 6 – раковины моллюсков.

мерно, так и в виде линз и включений неправильной формы. Во всем интервале присутствуют диатомеи, количество створок которых возрастает в базальном горизонте 70.2–75 см. Среди диатомей доминируют донные разновидности, чаще всего представители родов *Cymbella*, *Nitzschia*, *Denticula*, *Amphora* и др.; планктонные диатомеи немногочисленны. Раковины брюхоногих моллюсков (рис. 3), принадлежащие преимущественно к родам *Anisus* и *Lymnaea*, также представлены в значительном количестве, отдельные экземпляры могут достигать нескольких мм в диаметре.

Методом XRD-анализа в ансамбле минералов осадков озера Большое Алгинское определены карбонаты, кварц, плагиоклаз, калиевый полевой шпат, гипс, слюда (биотит), амфибол, хлорит, эпизодически присутствуют пирит, ангидрит CaSO_4 , тенардит Na_2SO_4 . Постоянный компонент осадка – карбонаты, количественный анализ которых выполнен ИК-спектроскопией. В распре-

лении карбонатов наблюдается отчетливый тренд увеличения содержания от подошвы к кровле разреза (рис. 2). Они сложены главным образом мелкозернистыми агрегатами плохо окристаллизованных частиц хемогенного кальцита с примесью низкомagneзиального кальцита. Присутствие в осадках низко-Mg кальцитов, представляющих собой твердые растворы MgCO_3 в кальците [11], удалось обнаружить с помощью метода математического моделирования рентгеновских дифракционных спектров. Разложение XRD профилей карбонатов на индивидуальные пики функцией Пирсона VII позволило установить положение максимума, интегральную интенсивность аналитического пика ($hkl=104$) карбонатных фаз и получить их количественные соотношения (рис. 4). Определение содержания MgCO_3 в структуре Mg-кальцитов проводилось по калибровочным графикам зависимости величины межплоскостного расстояния d_{104} от концентрации MgCO_3 в мол. % [8]. Количество магния в

Рис. 3. Раковина *Anisus* sp. хорошей сохранности (глубина 34–35 см).

природных низкотемпературных Mg-кальцитах является важнейшим индикатором физических и химических условий среды их образования [6]. Экспериментально показано, что осаждение кар-

бонатов кальцит-доломитового ряда определяется рядом факторов: Mg^{2+}/Ca^{2+} -отношением в воде, ее общей карбонатной щелочностью (концентрации HCO_3^- , CO_3^{2-} и H_2CO_3), соленостью, величиной pH, температурой, органической продуктивностью озера [3]. Эти факторы контролируются водным балансом озера, зависящим от климатических условий в его водосборном бассейне.

В результате проведенных исследований из осадочного разреза озера Большое Алгинское получена новая летопись климата голоцена Западного Забайкалья за последние 4900 лет. Выделено два крупных периода его эволюции. Первый этап, представленный отложениями интервала 47–75 см, охватывает конец теплого и влажного атлантического периода (время формирования озерного бассейна), и начало суббореального периода, длившегося в Евразии от 4800 до 2200 л. н. (^{14}C). Для этого этапа характерны сравнительно высокие скорости осадконакопления – порядка 1 мм/год, что следует из данных радиоуглеродного датирования, показывающих возраст осадков в подошве керна (74–75 см) – 4870 ± 180 лет и на уровне 37–38 см – 4480 ± 180 лет. Содержание хемогенного кальцита здесь сравнительно невелико, лишь в конце первого этапа оно достигает ~25% от минеральной части осадка, что свидетельствует о слабой минерализации и умеренной карбонатной щелочности вод. Противоположные тренды распределений стабильных изотопов в осадках

Рис. 4. Результаты моделирования функцией Пирсона VII экспериментальных XRD профилей ($hkl = 104$) озерных карбонатов, представленных вверху разреза кальцитом (обр. 3–4 см), в средней части – кальцитом и низкомagneзиальным кальцитом (обр. 39–40 см). Наблюдается хорошее соответствие модельных профилей карбонатов (сплошная линия) с экспериментальными (пунктирная линия).

(сравнительно высокие значения $\delta^{13}\text{C}$ и низкие отрицательные $\delta^{18}\text{O}$) указывают на положительный водный баланс и расцвет растительности в озере (рис. 2).

Осадки интервала 0–47 см сформировались во второй этап жизни озера, его возрастные границы: вторая половина суббореала – современность. Этот период характеризуется усилением осаднения хемогенных карбонатов при резком сокращении доли терригенного материала (рис. 2). Темпы осадконакопления падают: сопоставление датировок на глубинах 37–38 см (4480 ± 180 лет) и 9–10 см (80 ± 20 лет) дает среднюю скорость седиментации в этом субинтервале всего порядка 0.06 мм/год. Скорее всего, имели место перемены в осадконакоплении, что подтверждается расчетной скоростью седиментации в верхней части разреза (0–10 см), превышающей 1 мм/год. Карбонаты, количество которых может достигать 45–50% от минерального состава отложений, представлены кальцитом и низко-Mg кальцитом, появление которого в озерных отложениях (и/или увеличение степени его магнезиальности) является индикатором обмеления водоема, усиления его минерализации вследствие иссушения климата [4, 5]. В кровле разреза доля карбоната несколько понижается и он полностью сложен кальцитом (рис. 4). Ковариантность трендов распределений значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ в этом интервале является характерной чертой закрытых озер [13].

Заключение. Сопоставление карбонатной записи с данными литологического анализа, результатами определения стабильных изотопов ^{18}O и ^{13}C и распределением некоторых геохимических индикаторов климатических изменений (Mg/Ca отношение) позволило установить, что озеро на протяжении всего рассматриваемого периода было мелководным, открытым на начальном и закрытым на последнем этапе своего развития. Прослеживается отчетливая тенденция увеличения содержания карбонатов от подошвы к кровле разреза, что свидетельствует об усилении сухости голоценового климата на территории Баргузинской впадины. В начале суббореального периода (глубина ~47 см) происходят серьезные изменения гидрологического режима озера, обусловленные аридизацией климата, и лишь в последние десятилетия отмечается некоторая тенденция к его увлажнению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баргузинская котловина (в прошлом, настоящем и будущем) / Отв. ред. В.Е. Викулов. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1993. Вып. 2. 157 с.
2. Намсараев Б.Б., Хахинов В.В., Гармаев Е.Ж. и др. Водные системы Баргузинской котловины. Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2007. 154 с.
3. Нечипоренко Г.О., Бондаренко Г.П. Условия образования морских карбонатов. М.: Наука, 1988. 132 с.
4. Солотчина Э.П. Структурный типоморфизм глинистых минералов осадочных разрезов и кор выветривания. Новосибирск: ГЕО, 2009. 234 с.
5. Солотчина Э.П., Скляр Е.В., Солотчин П.А. и др. Минералогия и кристаллохимия карбонатов голоценовых осадков озера Киран (Западное Забайкалье): связь с палеоклиматом // Геология и геофизика. 2014. Т. 55 (4). С. 605–618.
6. Солотчина Э.П., Скляр Е.В., Солотчин П.А. и др. Реконструкция климата голоцена на основе карбонатной осадочной летописи малого соленого озера Верхнее Белое (Западное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2012. Т. 53 (12). С. 1756–1775.
7. Cohen A.S. Paleolimnology: the history and evolution of lake systems. Oxford University Press, New York, 2003, 500 p.
8. Deelman J.C. Low-temperature formation of dolomite and magnesite. Open-access e-book. 2011. 512 p. <http://www.jcdeelman.demon.nl/dolomite/bookprospectus.html>.
9. Last W.M. Geolimnology of salt lakes // Geosciences Journ. 2002. V. 6. № 4. P. 347–369.
10. Last W.M., Ginn F.M. Saline systems. 2005. 1:10. doi: 10.1186/1746-1448-1-10.
11. Mackenzie F.T., Bischoff W.D., Bishop F.C. et al. Carbonates: Mineralogy and Chemistry / R.J. Reeder (Ed). Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, Chantilly, Virginia, U.S.A. 1983. V. 11. P. 97–144.
12. Smoot J.P., Lowenstein T.K. Depositional environments of non-marine evaporites // Evaporites, Petroleum and Mineral Resources / J.L. Melvin (Ed). New York: Elsevier, 1991. p. 189–348.
13. Talbot M.R. A review of palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates // Chemical Geology (Isotope Geoscience Section), 1990. V. 80. P. 261–279.

Mineralogy of Holocene Sediments of Shallow Lakes in the Baikal Region: A Connection with Paleoclimate

I.V. Danilenko, P.A. Solotchin, E.P. Solotchina

*Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;
Ira27021980@mail.ru*

The results of a comprehensive study of the Holocene terrigenous-evaporite section of bottom sediments from one of the shallow saline lakes with carbonate sedimentation, located on the territory of the Barguzin basin (Republic of Buryatia) are provided. The researches were carried out using a wide complex of methods: x-ray diffractometry (XRD), IR spectroscopy, laser granulometry, determination of stable isotopes ^{18}O and ^{13}C and other techniques. The method of mathematical modelling of XRD patterns of endogenic carbonate minerals is established that they are represented by calcite and low-Mg calcite. The dynamics of change in content of carbonates in lake sediments from the base to the roof of the section (from ~4900 years ago to the present day) was seen. The obtained carbonate record, supplemented by results of other analyses reveals the evolution of the lake basin during the Holocene depending on changes in regional climate and environment.

Keywords: terrigenous-evaporite section of bottom sediments, x-ray diffractometry (XRD), determination of stable isotopes ^{18}O and ^{13}C , carbonate record, evolution of the lake basin, changes in regional climate.