——— ЛИТОЛОГИЯ ———

УДК 549.742.1: 548.3:551.312:551.583

ОСАДОЧНАЯ ЛЕТОПИСЬ ОЗЕРА БОЛЬШОЙ БАГАН (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ): ОТКЛИК НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ ГОЛОЦЕНА

© 2022 г. П. А. Солотчин^{1,*}, академик РАН М. И. Кузьмин², Э. П. Солотчина¹, А. Е. Мальцев¹, Г. А. Леонова¹, А. Н. Жданова¹, С. К. Кривоногов^{1,3}

Поступило 08.06.2022 г. После доработки 09.06.2022 г. Принято к публикации 07.07.2022 г.

В статье приводятся результаты литолого-минералогических исследований голоценовых донных отложений малого гиперсалинного (минерализация до 282 г/л) озера Большой Баган, расположенного на территории Восточно-Барабинской низменности (юг Западной Сибири). Методы исследования – рентгеновская дифрактометрия (XRD), ИК-спектроскопия, лазерная гранулометрия, сканирующая электронная микроскопия, элементный анализ, радиоуглеродное датирование. Установлено, что на протяжении голоцена в озерном бассейне происходило интенсивное аутигенное минералообразование; среди новообразованных минеральных фаз доминируют галит, гипс и карбонаты. Математическим моделированием сложных XRD-профилей в ансамбле карбонатных минералов установлены Мд-кальциты разной степени магнезиальности, Са-избыточные доломиты, арагонит и изредка Mg-сидерит. Проведенные минералого-кристаллохимические исследования, дополненные результатами других анализов, позволили выделить 4 стадии эволюции оз. Большой Баган в голоцене, обусловленные вариациями регионального климата. Границы стадий в целом отвечают границам климатостратиграфических подразделений шкалы Блитта-Сернандера: І – конец бореала – образование озера, влажный климат; II – атлантик – иссушение климата, обмеление; III – суббореал – неустойчивый климат, частая смена обстановок; IV – субатлантик – прохладный и умеренно сухой климат. Зафиксированы минералогические сигналы проявления глобальных климатических событий Бонда на территории юга Западной Сибири.

Ключевые слова: гиперсалинное озеро, донные отложения, карбонаты, XRD-анализ, геохимия, голоцен, палеоклимат, Западная Сибирь

DOI: 10.31857/S2686739722700037

Среди многочисленных малых озер Западной Сибири особую группу составляют соленые и солоноватоводные бассейны, приуроченные к территориям с господством аридных и семиаридных климатических обстановок. 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 окружающей природной среды [1].

Повосиоирск, Госсия

Между тем подобные объекты долгое время оставались на периферии внимания специалистов, как в нашей стране, так и за рубежом: "...исследования соленых озер в большинстве регионов мира отстали от таковых для пресноводных и речных бассейнов" [2].

Однако в связи с резкими изменениями климата на планете и неопределенностью климатического прогноза ситуация за последние два десятилетия кардинально изменилась. Наблюдается рост публикаций, посвященных климатическим летописям голоцена из осадков малых соленых озер, поскольку голоценовые обстановки можно рассматривать как близкие аналоги современности и/или как потенциальные аналоги климата будущего [3–6]. Кроме того, отложения этого возраста, как правило, не подвергались глубоким постседиментационным преобразованиям. В нашей стране, в том числе на территории Сибири, проводятся подобные исследования, однако, они, во-первых, немногочисленны, а во-вторых,

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

¹¹⁰⁶⁰сиоирск, 1 оссия

² Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия ³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

^{*}E-mail: paul@igm.nsc.ru



Рис. 1. Карта-схема расположения оз. Большой Баган. На врезке — конфигурация озера (Google Earth) с точкой бурения.

как и работы иностранных авторов, базируются главным образом на результатах палинологического и диатомового анализов, распределении в разрезах макро- и микроэлементов. Вместе с тем изменения природной среды и климата, происходившие в этот период, не могли не отразиться на литолого-минералогических особенностях отложений местных водных бассейнов. Предлагаемая статья нацелена на получение высокоразрешающей летописи климата голоцена юга Западной Сибири из осадочного разреза малого горько-соленого озера Большой Баган с карбонатным типом седиментации. В основе авторского подхода к палеоклиматическим реконструкциям лежат детальные минералого-кристаллохимические исследования озерных осадков, результаты которых рассматриваются в комплексе с данными других видов анализа.

Впервые объектом исследования являются донные осадки озера Большой Баган, отличительной особенностью которого является очень высокая степень минерализации вод. Озеро расположено в пределах Восточно-Барабинской низменности в лесостепной зоне Новосибирской области вблизи границы с Казахстаном (рис. 1). Площадь водной поверхности составляет около 5.6 км², глубина водоема составляет около 0.65 м. Озерная впадина намного больше современного озера, и объединяет само озеро, южный сухой залив, представляющий собой соляную равнину, и расположенное южнее озеро Малый Баган с его продолжением в виде системы сухих засолоненных впадин. Общая площадь впадины составляет ок. 28 км². В прошлом уровень озера поднимался примерно на 8-9 м относительно современного состояния. Вода заливала соседние впадины, и территория представляла собой единое озеро. Рельеф района – равнинная степь с невысокими гривами, климат резко континентальный. В наше время озеро является конечным бассейном стока небольшой мелководной реки Баган. Его воды по величине общей минерализации 282 г/л относятся к семейству рассолов, pH = 7.32, ионный состав приведен в табл. 1.

Длина керна, поднятого в центральной части озера (53.89804° с.ш., 77.12836° в.д.), составляет 362 см (рис. 2). Отложения отличаются значительной пестротой литологического состава. Шаг опробования осадков составлял 2–5 см. В самом низу разреза (317–362 см) залегает суглинок с незначительной примесью песка и гипса в интервале 322–324 см. Его перекрывает толща (284–317 см), сложенная серыми опесчаненными глинистыми отложениями с прослоями мелкозернистого пес-

HCO ₃	Cl-	NO_2^-	NO_3^-	SO_{4}^{2-}	F^{-}	PO ₄ ³⁻	K^+	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	NH_4^+
1.543	143	< 0.5	<0.5	38	< 0.3	0.008	0.87	0.64	78	20	<0.5

Таблица 1. Ионный состав озерной воды (г/л)

ка, широко распространенного в окрестностях озера. Собственно озерные, преимущественно алевритовые осадки имеют мощность 284 см (рис. 2). Их подошва (249-284 см) представлена слоистыми голубовато-серыми, в нижней части темно-серыми отложениями; на уровне 256-258 см обнаруживаются крупные (до 5 мм) кристаллы гипса. В интервале 110-249 см залегают плотные слоистые коричнево-серые осадки, замещающиеся вверх по разрезу (70-110 см) темно-серыми разновидностями, с прозрачными линзовидными кристаллами гипса на уровне 95-96 см. Интервал 32-70 см сложен слоистыми зеленовато-серыми обводненными осадками, а интервал 2-32 см сильно обводненным озерным илом черного цвета без видимых слоев (гиттия). Верх разреза (0-2 см) представляет собой корку соли белого цвета.

Отложения охарактеризованы 12 радиоуглеродными датами (рис. 2). Более древняя часть толщи (110–284 см) характеризуется относительно низкой скоростью осадконакопления ~0.25 мм/год, что позволяет предполагать довольно глубоководный бассейн. В верхней части разреза (0–110 см) средняя скорость седиментации почти в 2 раза выше и составляет ~0.52 мм/год. Это обстоятельство указывает на обмеление озера в течение последних 2100 кал. лет.

Изучение осадков проводилось комплексом методов, включающим рентгеновскую дифрактометрию (XRD), ИК-спектроскопию, лазерную гранулометрию, рентгенофлуоресцентный анализ, электронную микроскопию (СЭМ), радиоуглеродное датирование (AMS) и др. Дифференциальная диагностика карбонатных минералов в озерных отложениях выполнена методом математического моделирования XRD-профилей высокого разрешения [7]. Разложением дифракционных профилей карбонатов на отдельные пики с помощью функции Пирсона VII выявлены их положение, интегральная интенсивность и количественные соотношения. Рентгеновские исследования проведены на дифрактометре ARL X'TRA (излучение Си К_α). Для фазового анализа образцы были отсканированы в интервале от 2° до 65° (2 Θ) с шагом 0.05°, время сканирования в точке 3 с, для моделирования XRD-профилей карбонатной составляющей осадка — в интервале от 26° до 32° (2 Θ) с тем же шагом, но увеличенным временем сканирования в точке (15 с). ИК-спектры были записаны на спектрометре VERTEX 70 FT I. Образцы готовились методом прессования таблеток с KBr. Химический состав образцов определялся на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP. Изучение морфологии карбонатных минералов проводилось в сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 "TESCAN".

По данным рентгенофазового анализа (рис. 3) среди терригенных минералов на протяжении всего разреза в озерных отложениях доминируют кварц, полевые шпаты, представленные главным образом плагиоклазом, присутствуют в подчиненном количестве плохо окристаллизованная слюда, хлорит, изредка амфибол и пирит. Среди аутигенных минералов преобладают галит, гипс, карбонаты кальцит-доломитового ряда, в верхах разреза присутствует арагонит, следы цеолита (анальцима), в соляной корке примесь коньяита – очень неустойчивого водного сульфата $Na_2Mg(SiO_4)_2 \cdot 5H_2O$, в середине разреза эпизодически встречается Мд-сидерит. Как следует из данных гранулометрического анализа, в нижней части озерной толщи, сложенной преимущественно алевритами, наблюдается повышенное содержание песчаной фракции до 25% от вещественного состава. В верхних горизонтах осадок представлен алевритом с примесью пелита. Уменьшение размерности частиц вверх по разрезу, вероятно, обусловлено изменением гидродинамического режима р. Баган, а именно ослаблением энергии потока. В подстилающих озерные отложения породах (ниже 284 см) доминируют кварц и плагиоклаз, в подчиненном количестве присутствуют калиевый полевой шпат, кальцит, слюда, хлорит, галит, пирит, изредка следы амфибола.

Количество карбонатов в разрезе колеблется в пределах 5–50% от вещественного состава (рис. 2). Карбонатные минералы принадлежат преимущественно к кальцит-доломитовому ряду и представлены низкотемпературными тригональными Мд-кальцитами (Ca, Mg)CO₃ разной степени магнезиальности и Са-избыточными доломитами (содержание Ca в структуре <7%). В верхних горизонтах толщи присутствует хемогенный арагонит СаСО₃ (ромбическая сингония). С помощью модельного подхода удалось идентифицировать Ме-кальциты, являющиеся в соответствии с современными представлениями смешанными кристаллами, структура которых меняется в ряду кальцит-доломит от истинных твердых растворов до смешанослойных структур в зависимости от содержания магния, определяя их устойчивость. Эти структуры представляют собой последовательности кальцитовых и магнезитовых сло-

204



Рис. 2. Литологическая колонка голоценового разреза осадков оз. Большой Баган, возрастная модель, распределение в разрезе карбонатных минералов, терригенной компоненты, зольности и выделенные стадии эволюции озера. Условные обозначения: *1*-*2* – озерный ил (*1* – корка соли, *2* – черные илы); *3*-*6* – озерные глинистые алевриты (*3* – зеленовато-серые, *4* – темно-серые, *5* – коричневато-серые, *6* – голубовато-серые); *7* – подстилающие отложения.

ев, чередующихся с разной степенью порядка, образуя домены нанометрической размерности [8, 9]. Определение содержания Mg в карбонатах кальцит-доломитового ряда проводилось по калибровочным графикам зависимости величины d_{104} от содержания мол. % MgCO₃ в области углов 29.0°– 32.0° 2 Θ СuK α (рис. 4, табл. 2) [9, 10]. Низкая структурная упорядоченность хемогенных (Ca, Mg)-карбонатов находит свое подтверждение на

электронно-микроскопических снимках, где они представлены мелкозернистыми агрегатами плохо окристаллизованных частиц вне зависимости от величины отношения Mg/Ca. Известно, что осаждение низкотемпературных карбонатов кальцит-доломтового ряда определяется совокупностью целого ряда факторов: Mg/Ca-отношением в воде, ее общей карбонатной щелочностью, соленостью, величиной pH, температурой и



Рис. 3. Дифрактограммы образцов донных отложений подошвы (обр. 240–250 см) и кровли (обр. 16–32 см) осадочного разреза оз. Большой Баган.

органической продуктивностью водоема [11]. Эти факторы контролируются водным балансом озера, зависящим главным образом от климатических условий в регионе. Ранее нами было показано [7], что влажный климат способствует образованию низкомагнезиальных и промежуточных Mg-кальцитов, его аридизация сопровождается отложением высокомагнезиальных кальцитов и кальциевых доломитов.

206

На основании изучения минералого-кристаллохимических особенностей и количественных соотношений карбонатов методом моделирования их XRD-профилей были выделены стадии эволюции оз. Большой Баган в зависимости от изменений регионального климата. В целом стадии совпадают с климатическими фазами голоцена по шкале Блитта-Сернандера. Стадия I – образование озера – приходится на вторую половину бореала (ок. 9000-7800 кал.л.н.). Влажность осадков по сравнению с подстилающим горизонтом увеличивается, растет содержание карбонатов, уменьшается поступление терригенного материала (рис. 2). Небольшое содержание галита предполагает относительно низкую соленость озерной воды. Установлено, что карбонаты этой стапредставлены низкомагнезиальными дии И промежуточными разновидностями в соотношении 50:50 (обр. 260-264 см), что указывает на сравнительно высокое стояние вод бассейна (рис. 4, табл. 2).

В стадию II, отвечающую атлантическому периоду (ок. 7800—5700 кал. л.н.), содержание карбонатов заметно возрастает, среди них появляются высоко-Мg кальциты и Са-доломиты, влаж-



Рис. 4. Результаты моделирования экспериментальных XRD-профилей карбонатов осадков оз. Большой Баган. Очевидно хорошее соответствие модельных профилей (сплошная линия) с экспериментальными (точки). Дифракционные пики индивидуальных фаз описаны функцией Пирсона VII. Общее содержание карбонатов в образце принимается за 100%.

ность осадков падает. Все это свидетельствует об установлении в регионе засушливых природных обстановок. На уровне ок. 217 см (рис. 2) в разрезе отмечается пик карбонатности, который, судя по возрастной модели, может соответствовать глобальному климатическому событию Бонда 4 (засуха) [12]. Небольшая мощность осадков в инт. 5800–6900 кал. л.н. указывает на возможные перерывы в седиментации (плайевое озеро). Стадия III – суббореал (~5700–2500 кал. л.н.) – отличается переменными количествами и соотношениями карбонатных фаз в разрезе. Вероятно, климат в этот период был неустойчивым, с частой сменой коротких сухих и влажных эпизодов.

Стадия IV – субатлантик (~2500 кал. л.н. – наше время) – судя по набору карбонатных фаз, включающему как высоко-, так и низко-Мg разновидности, а также арагонит (рис. 4, табл. 2), в целом характеризуется умеренно прохладным и сухим климатом. Однако в разрезе периодически наблюдаются заметные флуктуации. Интервал 60–90 см отличается пониженной зольностью, что указывает на обстановки, благоприятные для

Employue av	Kanfoueru	No a mana	$2\Theta^{\circ}C_{11}K$	dÅ	Содержание		
глубина, см	кароонаты	л⊎линии	$20 \text{ Cu} \text{K}_{\alpha}$	u, A	MgCO ₃ , мол. %	Фазы, %	
16-32	Арагонит	1	26.14	3.41	0	20	
(Стадия IV)	Низко-Мд кальцит	2	29.461	3.033	0.75	17	
	Промежуточный Мд кальцит	3	29.660	3.013	7.0	41	
	Высоко-Мg кальцит	4	29.831	2.996	13.0	17	
	Са-избыточный доломит	5	30.762	2.908	43.0	5	
260-264	Низко-Мд кальцит	1	29.492	3.030	2.0	50	
(Стадия I)	Промежуточный Мд кальцит	2	29.781	3.001	6.0	50	

Таблица 2. Параметры модельных XRD-профилей карбонатов образцов осадков оз. Большой Баган, представленных на рис. 4

высокой биопродуктивности. На уровне ок. 50 см (рис. 2) наблюдается пик карбонатности, по нашему мнению. связанный с климатическим событием Бонда I (позднеантичный малый ледниковый период) [12]. В это время в осадке среди карбонатов доминирует арагонит (до 45%). Хемогенное образование арагонита происходит в vзком диапазоне физико-химических условий, соответствующем относительно низким температурам и давлениям (близповерхностные условия), а соосаждение арагонита с Мд-кальцитами и Садоломитом указывает на повышенные концентрации в воде ионов Mg²⁺, ее соленость и невысокую карбонатную шелочность [11, 13]. Ионы Mg²⁺ окружены плотной гидратной оболочкой $[Mg(H_2O)_6]^{+2}$. Сорбируясь на поверхности зародышей кальцита, они сдерживают его рост. В то же время адсорбция гидратированных ионов магния на поверхности арагонита в силу особенностей его структуры проявляется значительно слабее и мало влияет на скорость его кристаллизации [9, 11]. Арагонит характеризуется более высоким межплоскостным расстоянием основного аналитического пика $d_{111} = 3.42$ Å по сравнению с эталонным ($d_{111} = 3.397$ Å). Это обстоятельство связано с вхождением Sr в позиции Ca. На протяжении стадии IV происходит постепенное увеличение содержания галита до 15-35% от вещественного состава осадков, отмечаются значительные колебания содержания карбонатов и сокращение доли терригенной составляющей. В минеральном составе соляной корки (верх разреза) установлен галит с небольшой примесью коньяита. Наблюдается общий тренд на засоление (по хлоридному типу) и обмеление озера.

Таким образом, литологические и минералогические исследования донных отложений оз. Большой Баган, дополненные результатами других анализов, позволили получить климатическую запись голоцена высокого разрешения для Восточно-Барабинской низменности. Были определены этапы эволюции бассейна, соответствующие региональным циклам аридизации/гумидизации; проведена корреляция с глобальными климатическими событиями. Впервые для реконструкции палеоклимата нами были успешно использованы донные осадки гиперсалинного озера. Полученные результаты стали важным источником новой информации о климате голоцена на юге Западной Сибири.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены по государственному заданию ИГМ СО РАН при поддержке РФФИ (гранты № 21-55-53037 ГФЕН_а и № 19-29-05085 мк). Основные аналитические работы проведены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН и ЦКП "Геохронология кайнозоя" СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Last W.M. Geolimnology of salt lakes // Geosciences J. 2002. V. 6. № 4. P. 347–369.
- Deocampo D.M. The geochemistry of continental carbonates // Carbonates in continental settings. Developments in sedimentology / Eds. A.M. Alonso-Zara, L.H. Tanner. Amsterdam, Elsevier. 2010. V. 62. P. 1–60.
- 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.
- 5. Солотчин П.А., Солотчина Э.П., Скляров Е.В., 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., Кузьмин М.И., Солотчин П.А., Мальцев А.Е., Леонова Г.А., Даниленко И.В. Аутигенные карбонаты голоценовых осадков озера Иткуль (юг Западной Сибири) - индикаторы изменений климата // ДАН. 2019. Т. 487. № 1. С. 54–59.
- Solotchina E.P., Solotchin P.A. Composition and structure of low-temperature natural carbonates of the calcite-dolomite series // Journal of Structural Chemistry. 2014. V. 55. P. 779–785.
- Navrotsky A., Capobianco C. Enthalpies of formation of dolomite and of magnesian calcites // Amer. Miner. 1987. V. 72 (7–8). P. 782–787.
- 9. *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.
- Goldsmith J.R., Graf D.L. Relation between lattice constants and composition of the Ca-Mg carbonates // Amer. Miner. 1958. V. 43. P. 84–101.
- Нечипоренко Г.О., Бондаренко Г.П. Условия образования морских карбонатов. М.: Наука, 1988. 133 с.
- Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., deMenocal P., Priore P., Cullen H., Hajdas I., Bonani G., A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and Glacial climates // Science. 1997. V. 278. P. 1257–1266.
- Лидер М. Седиментология. Процессы и продукты. М.: Мир, 1986. 439 с.

SEDIMENTARY RECORD OF LAKE BOLSHOY BAGAN (WESTERN SIBERIA): RESPONSE TO HOLOCENE CLIMATIC EVENTS

P. A. Solotchin^{*a*,#}, Academician of the RAS M. I. Kuzmin^{*b*}, E. P. Solotchina^{*a*}, A. E. Maltsev^{*a*}, G. A. Leonova^{*a*}, A. N. Zhdanova^{*a*}, and S. K. Krivonogov^{*a*,*c*}

^a V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

^b A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

^c Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

[#]E-mail: paul@igm.nsc.ru

We present the results of lithological and mineralogical studies of Holocene bottom sediments from the shallow hypersaline (mineralization up to 282 g/L) Lake Bolshoy Bagan, located in the East Baraba lowland (south of Western Siberia). The research methods includes X-ray diffractometry (XRD), infrared spectroscopy, laser grain size analysis, scanning electron microscopy, elemental composition study, radiocarbon (^{14}C AMS) dating. It was found that during the Holocene intensive authigenic mineral formation took place in the lake basin; halite, gypsum and carbonates dominate among the newly formed mineral phases. By the mathematical modeling of complex XRD patterns Mg-calcites with different Mg contents, excess-Ca dolomites, aragonite and occasionally Mg-siderite have been established in the assemblage of carbonate minerals. The conducted mineralogical and crystallochemical studies., supplemented by the results of other analyses, allowed us to identify 4 stages of the evolution of Lake Bolshoy Bagan in the Holocene, due to variations in the regional climate. The boundaries of the stages generally correspond to the boundaries of the climatic phases by the Blytt–Sernander classification: stage I (the end of the Boreal) – lake formation, humid climate; stage II (Atlantic) – climate drying, shallowing of the lake; stage III (Subboreal) – unstable climate, frequent change of conditions; stage IV (Subatlantic) – moderately cool and dry climate. Mineralogical signals of the global climatic Bond events in the south of Western Siberia have been identified.

Keywords: hypersaline lake, bottom sediments, carbonates, XRD analysis, geochemistry, Holocene, paleoclimate, Western Siberia