

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2025, Том 17, № 4 / 2025, Vol. 17, Iss. 4 <https://esj.today/issue-4-2025.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/29NZVN425.pdf>

1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Даниленко, И. В. Минеральные индикаторы климата в голоценовых донных осадках соленых озер Западного Забайкалья / И. В. Даниленко, П. А. Солотчин // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 4. —

URL: <https://esj.today/PDF/29NZVN425.pdf>.

For citation:

Danilenko I.V., Solotchin P.A. Mineral indicators of climate in Holocene bottom sediments of Western Transbaikalia saline lakes. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(4): 29NZVN425. Available at: <https://esj.today/PDF/29NZVN425.pdf>.

(In Russ., abstract in Eng.).

Основные аналитические работы проведены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН

УДК 549.02:551.583

Даниленко Ирина Владимировна

ФГБУН «Институт геологии и минералогии имени Н.С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук», Новосибирск, Россия
Младший научный сотрудник
E-mail: iv_danilenko@igm.nsc.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=116219

Солотчин Павел Анатольевич

ФГБУН «Институт геологии и минералогии имени Н.С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук», Новосибирск, Россия
Доктор геолого-минералогических наук
E-mail: paul@igm.nsc.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=64162

Минеральные индикаторы климата в голоценовых донных осадках соленых озер Западного Забайкалья

Аннотация. В статье представлены результаты комплексных литолого-минералогических исследований датированных разрезов голоценовых донных осадков двух малых соленых озер Западного Забайкалья для проведения палеоклиматических реконструкций. Методы исследований: рентгеновская дифрактометрия (XRD), инфракрасная (ИК) спектроскопия, лазерная гранулометрия, изотопный анализ, радиоуглеродное датирование. Установлено, что возраст изученных отложений лежит в диапазоне от начала бореального периода голоцена (по шкале Блитта-Сернандера) до современности. По данным литологических исследований кернового материала, донные осадки изученных озер представляют собой терригенно-эвапоритовые образования преимущественно алевритовой и пелитовой размерности. Основными компонентами терригенной части осадков являются кварц, плагиоклаз, калиевые полевые шпаты и слоистые силикаты; аутигенная составляющая отложений представлена преимущественно карбонатами кальцит-доломитового ряда — Mg-кальцитами различной степени магнезиальности и Ca-избыточными доломитами. Дифференциальная диагностика и анализ структурно-кристаллохимических характеристик карбонатов выполнен методом математического моделирования их сложных XRD профилей с помощью функции Пирсона VII. Показано, что именно аутигенные карбонатные минералы являются индикаторами палеоклимата: в обстановках повышенной аридности в изученных озерах накапливались высоко-Mg кальциты и Ca-избыточные доломиты, а гумидизация климата приводила к

осаждению низко-Mg кальцитов и промежуточных Mg-кальцитов. На основе полученных данных реконструирована история развития изученных озерных бассейнов и сделаны выводы об эволюции природно-климатических обстановок Западного Забайкалья в голоцене. Показано, что характерной особенностью голоценового климата Западного Забайкалья является доминирование локальных природно-климатических факторов над общими региональными климатическими трендами.

Ключевые слова: соленые озера; донные осадки; голоцен; XRD анализ; аутигенные карбонаты; палеоклимат; Западное Забайкалье

Введение

Существующая в последние четверть века тенденция к увеличению частоты малопредсказуемых, в том числе и катастрофических климатических событий, происходящих в различных регионах планеты, вызывает закономерную тревогу мирового сообщества. Неопределенность как краткосрочных, так и долгосрочных прогнозов, дискуссионность роли антропогенного вклада в современное потепление обуславливают высокую актуальность палеоклиматических исследований, поскольку основной подход к разработке наиболее вероятных сценариев дальнейшей эволюции природной среды заключается в поисках аналогичных событий на протяжении прошлых геологических эпох. В этой связи на первый план выходит задача выявления объектов, могущих служить естественными палеоклиматическими архивами. В мировой практике весьма перспективными для реконструкции климата считаются голоценовые (последние ~11 700 лет) донные отложения малых озерных бассейнов с повышенной минерализацией вод, поскольку в силу небольших размеров и глубин подобные водоемы весьма чувствительны даже к незначительным изменениям окружающих природных обстановок [1; 2].

Предлагаемый нами подход к решению обозначенной проблемы заключается в выявлении минеральных индикаторов палеоклимата в озерных осадках. Для солоноватоводных и соленых бассейнов аридных и семиаридных зон такими индикаторами являются продукты аутигенеза. Состав, структура, минералого-кристаллохимические характеристики аутигенных фаз непосредственным образом зависят от химизма озерных вод, который в свою очередь контролируется климатом региона. Наиболее отчетливо эта зависимость проявляется для низкотемпературных хемогенных карбонатов, которые характеризуются широким спектром изоморфизма в их кристаллической решетке и значительными вариациями степени порядка/беспорядка в структуре [3; 4].

Обширный Байкальский регион представляет собой удобный полигон для проведения подобных исследований, поскольку на его территории расположено большое количество озер, различающихся по глубине, минерализации и трофности, в том числе и таких, в которых на протяжении голоцена происходило осаждение карбонатов [4; 5]. Целью настоящего исследования является реконструкция природной среды и климата голоцена Западного Забайкалья на основе комплексного изучения карбонатсодержащих донных осадков двух малых минеральных озер.

Объекты и методы исследований

Объектами исследований послужили голоценовые осадочные разрезы двух мелководных соленых бессточных озёр Западного Забайкалья с высокими содержаниями аутигенных карбонатов: оз. Верхнее Белое (Джидинская котловина) и оз. Сульфатное (Гусиноозерская котловина) (рис. 1). Данные районы Западного Забайкалья характеризуются резкой

континентальностью климата с большими годовыми и суточными колебаниями температуры и высокой сухостью воздуха. Среднегодовое количество осадков редко превышает 250–300 мм [6].



Рисунок 1. Карта-схема расположения изученных озер на территории Западного Забайкалья (выполнено авторами, основа — карта рельефа Бурятии из открытых источников (Wikipedia))

Оз. Верхнее Белое имеет площадь ~ 4 км², среднюю глубину ~ 1 м, соленость до 22 г/л. Водное питание осуществляется преимущественно за счет атмосферных осадков, а также небольшого ручья, впадающего с севера; воды озера относятся к хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатному натриевому типу. Площадь оз. Сульфатное ~ 10 км², средняя глубина $\sim 1,7$ м. Водное питание бассейн получает в основном за счет атмосферных осадков, а также подземных источников; воды озера хлоридно-сульфатные натриевые с минерализацией 5,6 г/л.

Отбор кернового материала был выполнен бурением со льда в зимний период. При изучении донных осадков применялся комплекс методов, включающий рентгеновскую дифрактометрию (XRD), ИК-спектроскопию, лазерную гранулометрию, определение стабильных изотопов кислорода ¹⁸O и углерода ¹³C, датирование разрезов методом AMS (¹⁴C) и гамма-спектрометрией (²¹⁰Pb). Дифференциальная диагностика карбонатных минералов выполнена с помощью математического моделирования рентгеновских дифракционных профилей, записанных с высоким разрешением. Рентгенофазовые исследования осуществлены на дифрактометре ARL X'TRA (излучение Cu K_α). Для полного фазового анализа образцы отсканированы в интервале от 2° до 65° (2 Θ) с шагом 0.05°, время сканирования в точке 3 сек; для проведения модельных расчетов сканирование проводилось в интервале от 26 до 32° (2 Θ) с тем же шагом, но с более длительным временем сканирования в точке (15 сек). ИК-спектры были записаны на спектрометре VERTEX 70 FT I. Образцы были приготовлены прессованием таблеток с KBr. Гранулометрический анализ выполнен на лазерном микроанализаторе частиц «Analysette 22 MicroTec» с предварительным удалением солей. Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и углерода ($\delta^{13}\text{C}$) был получен на масс-спектрометре Finnigan MAT 253. Радиоуглеродное датирование проводилось по карбонатному и органическому веществу в ЦКП «Геохронология кайнозоя» СО РАН (г. Новосибирск) и ряде зарубежных радиоуглеродных лабораторий; ¹⁴C-датировки были приведены в соответствие с календарным возрастом. Для построения возрастных моделей используется климатостратиграфическая шкала Блитта-Сернандера [7]. Данная шкала не является самой современной, однако нами отмечено

хорошее соответствие возрастных границ климатических периодов данной схемы границам стадий эволюции климата Байкальского региона.

Результаты и их обсуждение

Методами XRD анализа, ИК-спектроскопии и лазерной гранулометрии было установлено, что донные отложения изученных озер представляют собой терригенно-эвапоритовые образования преимущественно алевритовой и пелитовой размерности. Основными компонентами терригенной части осадков являются кварц, плагиоклаз и калиевые полевые шпаты, в подчиненных количествах присутствуют слоистые силикаты: мусковит, хлорит, смектит, иллит, смешанослойный иллит-смектит, каолинит. Аутигенная компонента отложений представлена карбонатами кальцит-доломитового ряда — Mg-кальцитами различной степени магниальности и Ca-избыточными доломитами в количестве 12–35 % вещественного состава осадков; эпизодически отмечаются следовые количества арагонита (рис. 2).

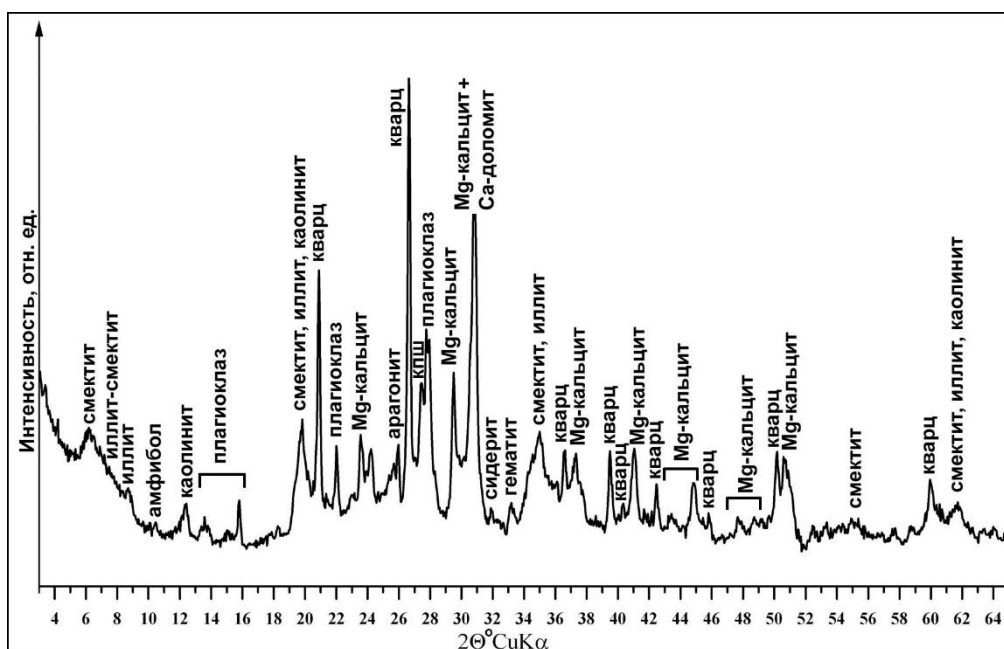


Рисунок 2. XRD профиль образца донных отложения оз. Верхнее Белое, гл. 50–51 см (выполнено авторами)

Для выявления всего спектра присутствующих карбонатных минералов нами использовался авторский метод моделирования — разложение их сложных XRD профилей на индивидуальные пики функцией Пирсона VII. Модельный подход позволил установить положение максимума, интегральную интенсивность аналитического пика каждой карбонатной фазы и получить их количественные соотношения. Mg-кальциты подразделяются на низкомагниальные с содержанием $MgCO_3$ в структуре до 5 мол. %, промежуточные с содержанием $MgCO_3$ от 5 до 17 мол. % и высокомагниальные с содержанием $MgCO_3$ вплоть до 43 мол. % [4]. В структуре Ca-избыточного доломита избыток $CaCO_3$ составляет 7–10 % в сравнении со стехиометрическим доломитом.

Как уже подчеркивалось выше, осаждение тех или иных аутигенных карбонатов определяется, прежде всего, геохимической спецификой озерных вод, которая контролируется водным балансом, зависящим, в свою очередь, от климата региона. Исследования, проведенные нами ранее на материале донных осадков соленых озер Прибайкалья [5], показали, что распределение этих минералов в разрезах подчиняется следующей закономерности: сравнительно

влажный климат и высокое стояние воды в бассейне ведет к осаждению низко-Mg и промежуточных Mg-кальцитов, а аридизация сопровождается выпадением высокомагнезиальных фаз, вплоть до Ca-избыточных доломитов.

Керн донных осадков оз. Верхнее Белое, несмотря на малую мощность (66 см) вскрывает наиболее древние из изученных отложений: возраст основания разреза (63–64 см) составляет ~10 800 кал. лет, что соответствует нижней границе бореального периода голоцена по шкале Блитта-Сернандера. В аутигенной составляющей отложений бореала преобладают низко-Mg разновидности кальцитов — до 55 % (рис. 3, 65–66 см), что свидетельствует об относительно высоком уровне стояния воды в озере и, соответственно, о повышенной гумидности природно-климатических обстановок. Низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ (-4,5...-7‰) и $\delta^{13}\text{C}$ (-2...-4‰) свидетельствуют в пользу положительного гидрологического баланса озера — увеличения притока свежих метеорных вод вследствие таяния ледников, обогащенных легкими изотопами кислорода и углерода.

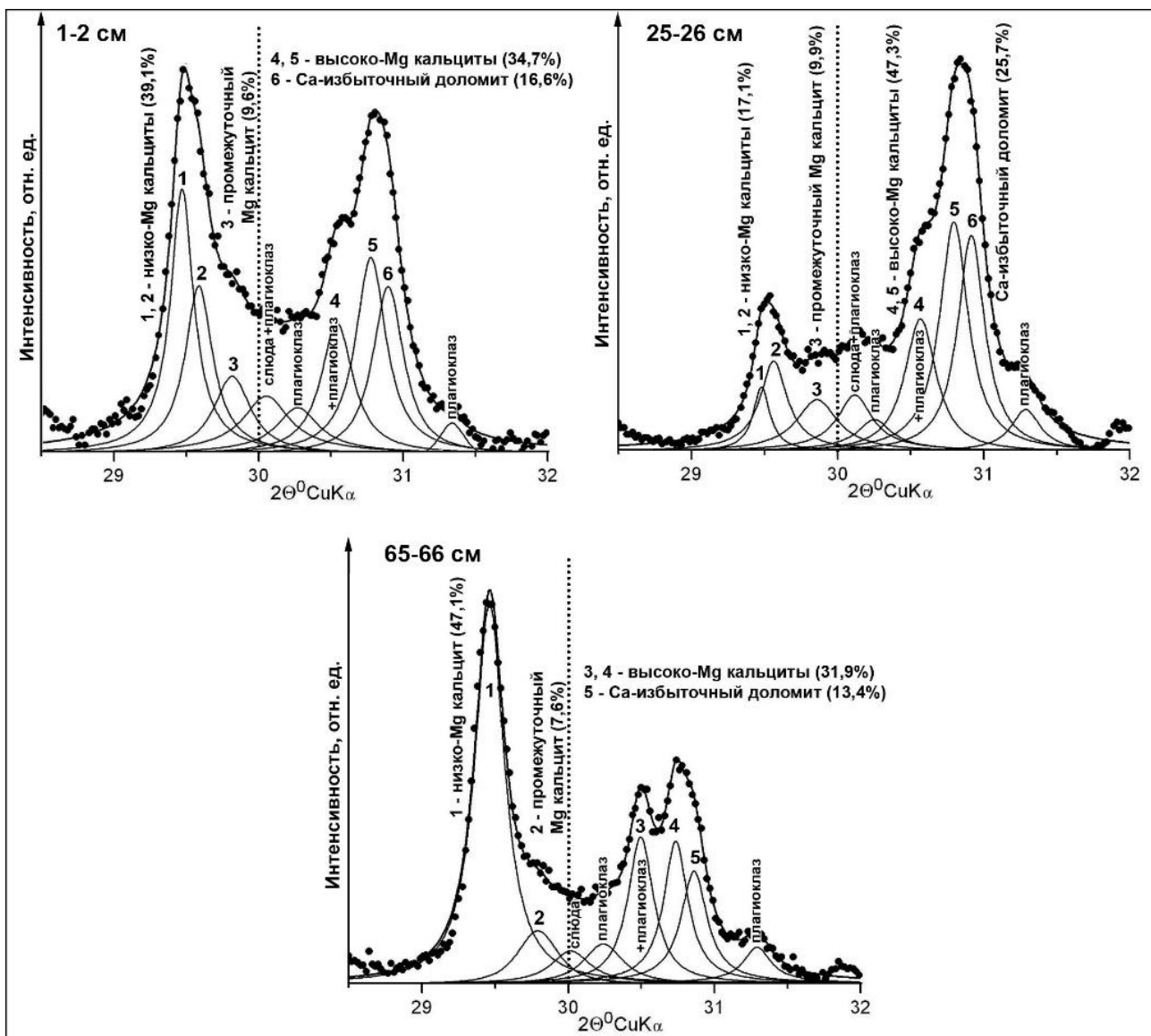


Рисунок 3. Результаты моделирования экспериментальных XRD профилей карбонатов оз. Верхнее Белое. Дифракционные пики индивидуальных фаз описаны функцией Пирсона VII. Общее содержание карбонатов в образце принимается за 100 % (выполнено авторами)

Отложения оз. Верхнее Белое, относящиеся к атлантическому периоду (22–55 см) характеризуются значительным (до 75 % карбонатной части осадка) доминированием высоко-Mg кальцитов и Са-избыточных доломитов (рис. 3, 25–26 см), что указывает на существенную аридизацию климата. О том же свидетельствуют и повышенные значения содержаний тяжелых изотопов кислорода и углерода, а также малая мощность накопившихся осадков. Последнее может указывать на плейстоценовые обстановки вследствие иссушения климата. Данная тенденция меняет знак с началом суббореального периода. Для последних этапов голоцена (суббореал-субатлантик) наблюдается рост содержания в осадках низкомагнезиальных разновидностей кальцитов, сумма которых в кровле разреза достигает 50 % от общего количества карбонатов (рис. 3, 1–2 см). Данный факт, а также рост содержаний легких изотопов кислорода и углерода, свидетельствуют о постепенной гумидизации климата региона в позднем голоцене.

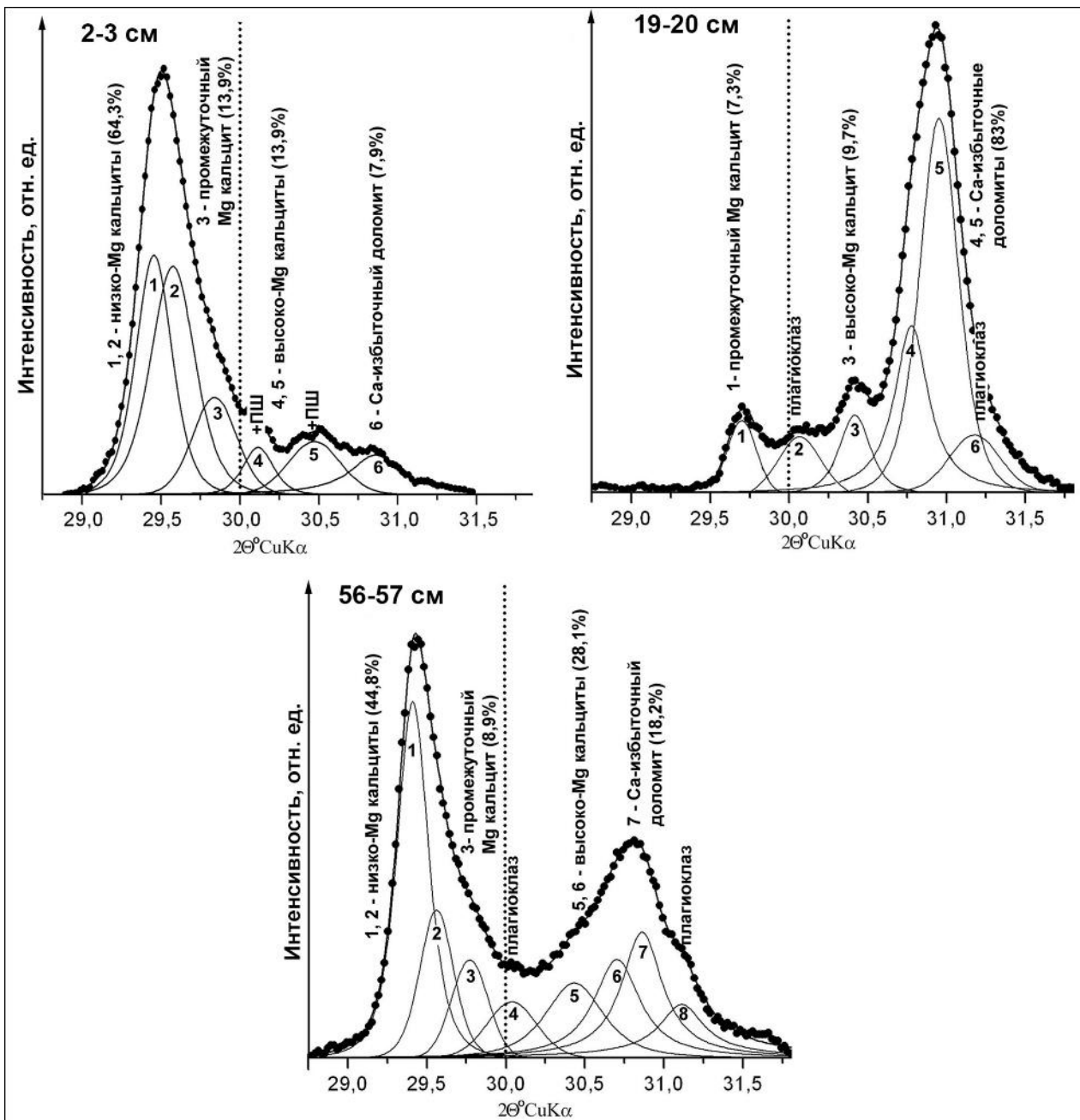


Рисунок 4. Результаты моделирования экспериментальных XRD профилей карбонатов оз. Сульфатное. Дифракционные пики индивидуальных фаз описаны функцией Пирсона VII. Общее содержание карбонатов в образце принимается за 100 % (выполнено авторами)

Иная картина наблюдается в разрезе оз. Сульфатное мощностью 57 см. По данным радиоуглеродного датирования возраст осадков на уровне 45–46 см составляет ~6 640 кал. лет, т. е. образование озера, как бассейна с карбонатной седиментацией приходится на первую половину атлантического периода голоцена. Среди аутигенных карбонатов доминируют низкомагнезиальные и промежуточные Mg-кальциты (рис. 4, 56–57 см), что, вкупе с низкими значениями $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ и самим фактом возникновения озера, говорит о сравнительной гумидности климата и достаточной влагообеспеченности территории. Изучение перекрывающих отложений суббореала и большей части субатлантического периода показало наличие признаков экстремального падения уровня воды в озерном бассейне, в частности, появление грубообломочных прослоев. Распределение аутигенных карбонатов также указывает на значительное иссушение климата — в отложениях резко доминируют Са-избыточные доломиты (более 80 % от суммы карбонатов), в то время как низко-Mg кальциты полностью отсутствуют (рис. 4, 19–20 см). Лишь в конце субатлантического периода (последние ~200 лет) наблюдается отчетливая тенденция гумидизации природно-климатических обстановок — в верхах разреза преобладают низко-Mg и промежуточные кальциты (рис. 4, 2–3 см).

Выводы

Выполненные минералого-кристаллохимические исследования аутигенных карбонатов донных осадков озер Западного Забайкалья, дополненные результатами литологического, изотопного и других анализов, позволили сделать следующие выводы о климате региона в голоцене. Региональный климат бореального периода (~10 700–7 800 л.н.) был сравнительно теплым и влажным. Это подтверждается результатами изучения отложений других озер Байкальского региона [8; 9], а также данными палинологических исследований [10].

Климат атлантического периода (~7 800–5 700 л.н.), который в Европейской части континента традиционно считается теплым и влажным, для Байкальского региона не может трактоваться столь же однозначно. Существенное потепление климата в это время, безусловно, имело место и в Забайкалье, однако влажность в разные периоды времени и в разных районах могла значительно варьировать. Так, в осадках оз. Верхнее Белое, относящихся к атлантическому периоду отмечаются высокие содержания высоко-Mg кальцитов и Са-избыточного доломита, повышенные значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$, указывающие на значительную аридность. В то же время в отложениях оз. Сульфатное накапливались низкомагнезиальные разновидности карбонатов, что свидетельствует об относительно высокой увлажненности климата.

Что касается суббореального и субатлантического периодов, то здесь картина также разнится. Накопление в осадках оз. Сульфатное высокомагнезиальных разновидностей карбонатов, явные следы обмеления водоема — все это свидетельствует об аридизации регионального климата. При этом в отложениях оз. Верхнее Белое, напротив, наблюдается общий рост содержания низко-Mg и промежуточных кальцитов, сопровождающийся падением значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$, что указывает на обводнение водоема и снижение его минерализации.

Таким образом, характерной особенностью голоценового климата Западного Забайкалья является доминирование локальных природно-климатических факторов над общими региональными (а, в конечном счете, и глобальными) климатическими трендами.

Заключение

Проведены комплексные литолого-минералогические исследования датированных разрезов голоценовых терригенно-эвапоритовых донных отложений двух малых соленых озер, расположенных на территории Западного Забайкалья. Терригенная компонента осадков

сложена в основном кварцем, плагиоклазом, калиевыми полевыми шпатами и слоистыми силикатами. Аутигенная составляющая представлена преимущественно карбонатами кальцит-доломитового ряда — магнезиальными кальцитами разной степени магнезиальности и Са-избыточными доломитами в количестве 12–35 % вещественного состава отложений. Дифференциальная диагностика, анализ ассоциаций, состава и структурных характеристик карбонатов выполнены методом математического моделирования их сложных XRD профилей. Показано, что в обстановках повышенной аридности климата в изученных озерах накапливались высоко-Mg кальциты и Са-избыточные доломиты, а гумидизация приводила к осаждению низко-Mg кальцитов и промежуточных Mg-кальцитов. На основе полученных данных реконструирована история развития изученных озерных бассейнов и сделаны выводы об эволюции природно-климатических обстановок Западного Забайкалья в голоцене.

ЛИТЕРАТУРА

1. Last W.M. Geolimnology of salt lakes / W.M. Last // *Geosciences Journal*. — 2002. — V. 6. — № 4. — P. 347–369.
2. Deocampo D.M. The geochemistry of continental carbonates / D.M. Deocampo // *Carbonates in Continental Settings: Geochemistry, Diagenesis and Applications: Developments in Sedimentology*. Alonso-Zarza A.M., Tanner L.H., (Eds.). — Elsevier, 2010. — V. 62 — P. 1–59.
3. Карбонаты: минералогия и химия / Ред. Ридер Р.Дж. — М.: Мир, 1987. — 494 с.
4. Солотчина Э.П. Состав и структура низкотемпературных природных карбонатов кальцит-доломитового ряда / Э.П. Солотчина, П.А. Солотчин // *Журнал структурной химии*. — 2014. — Т. 55. — № 4. — С. 814–820.
5. Солотчина Э.П. Климатические сигналы в карбонатной осадочной летописи голоцена озера Намши-Нур, Западное Прибайкалье / Э.П. Солотчина, Е.В. Скляр, Е.Г. Вологина, П.А. Солотчин, В.Н. Столповская, О.А. Склярова, О.П. Изох, Н.Н. Ухова // *Докл. РАН*. — 2011. — Т. 436. — № 6. — С. 814–819.
6. Солоноватые и соленые озера Забайкалья: гидрохимия, биология / Отв. ред. Б.Б. Намсараев. — Улан-Удэ: Изд-во Бурятск. гос. ун-та, 2009. — 340 с.
7. Хотинский Н.А. Голоцен Северной Евразии / Н.А. Хотинский. — М.: Наука, 1977. — 192 с.
8. Базарова В.Б. Особенности озерного осадконакопления в степной зоне Юго-Восточного Забайкалья в голоцене (на примере отложений оз. Зун-Соктуй) / В.Б. Базарова, Т.А. Гребенникова, Л.М. Мохова, Л.А. Орлова // *Геология и геофизика*. — 2011. — Т. 52. — № 3. — С. 426–438.
9. Решетова С.А. Растительность Центрального Забайкалья в позднеледниковье и голоцене / С.А. Решетова, Е.В. Безрукова, В. Паниzzo, Э. Хендерсон, А.Б. Птицын, А.В. Дарьин, И.А. Калугин // *География и природные ресурсы*. — 2013 — Т. 34. — № 2 — С. 110–117.
10. Безрукова Е.В. Озеро Котокель — опорный разрез позднеледниковья и голоцена юга Восточной Сибири / Е.В. Безрукова, С.К. Кривоногов, Х. Такахара, П.П. Летунова, К. Шичи, А.А. Абзаева, Н.В. Кулагина, Ю.С. Забелина // *Докл. РАН*. — 2008. — Т. 420. — № 2. — С. 248–253.

Danilenko Irina Vladimirovna

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia
E-mail: iv_danilenko@igm.nsc.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=116219

Solotchin Pavel Anatolievich

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia
E-mail: paul@igm.nsc.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=64162

Mineral indicators of climate in Holocene bottom sediments of Western Transbaikalia saline lakes

Abstract. We present the results of comprehensive lithological and mineralogical studies of dated sections of Holocene bottom sediments from two small saline lakes in Western Transbaikalia for paleoclimatic reconstructions. The research methods include X-ray diffractometry (XRD), infrared (IR) spectroscopy, laser granulometry, isotope analysis, radiocarbon dating. It has been established that the age of the studied sediments ranges from the beginning of the Boreal period of Holocene (on the Blytt–Sernander classification) to the present. According to the lithological studies of the core material, the bottom sediments of studied lakes are terrigenous-evaporite formations mainly of silty and pelitic size. The main components of the terrigenous part of the sediments are quartz, plagioclase, potassium feldspars and layered silicates. The authigenic component of the sediments is represented mainly by carbonates of the calcite-dolomite series — Mg-calcites of degrees of Mg contents and excess-Ca dolomites. Distinctive diagnostics and analysis of the structural and crystallochemical characteristics of carbonates were performed by mathematical modeling of their complicated XRD patterns using the Pearson VII function. It was shown that authigenic carbonate minerals are indicators of paleoclimate — in high-aridity environments high-Mg calcites and excess-Ca dolomites accumulated in the studied lakes and climate humidification led to the sedimentation of low-Mg calcites and intermediate Mg-calcites. Based on the data obtained the history of the studied lake basins is reconstructed and conclusions about the evolution of the natural and climatic conditions of Western Transbaikalia in the Holocene were made. It is shown that a characteristic feature of the Holocene climate of Western Transbaikalia is the dominance of local climatic factors over general regional trends.

Keywords: saline lakes; bottom sediments; Holocene; XRD analysis; autigenic carbonates; paleoclimate; Western Transbaikalia