

Научная статья
УДК 550.42
DOI: 10.18101/2542-0623-2025-4-68-78

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
ПО ИЗОТОПНЫМ СИГНАЛАМ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ
ОЗЕРА БОЛЬШОЕ ЕРАВНОЕ (ЗАБАЙКАЛЬЕ)**

Д. Б. Андреева, Ю. Б. Цыбенков, В. Цех

© **Андреева Дарима Бальжинимаевна**

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник,
Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
darima.andreeva@gmail.com

© **Цыбенков Юрий Бадмажапович**

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник,
Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
jur-cybenov@rambler.ru

© **Цех Вольфганг**

PhD (Biol.), профессор,
Байройтский университет
Германия, 954407, г. Байройт, ул. Университетская, 30
w.zech@uni-bayreuth.de

Аннотация. Палеоэкологические реконструкции для внутриконтинентальных регионов Забайкалья имеют ключевое значение для понимания реакции экосистем на глобальные климатические изменения. В данном исследовании представлены результаты комплексного анализа керн донных отложений (2 м) озера Большое Еравное (Еравнинская котловина). На основе трех ^{14}C -дат установлено, что время аккумуляции отложений в керне охватывает период около 38 тыс. лет и является одним из уникально длительных временных интервалов для мелководных озер региона. Анализ элементного, изотопного состава и гранулометрии позволил выделить четыре фазы осадконакопления, отражающие смену климатических условий. Установлено, что в теплые и влажные периоды формировалось преимущественно аллохтонное органическое вещество (ОВ) ($\text{C/N} = 15\text{--}19$, $\delta^{13}\text{C}$ от $-26,1$ до $-24,0\text{‰}$). В холодные и аридные фазы возрастала роль автохтонного ОВ, а гидродинамическая активность была минимальной, что связывается с устойчивым ледовым покровом. Наиболее значимые изменения зафиксированы на рубеже плейстоцена и голоцена: скачкообразное усиление гидродинамики и сдвиг источников ОВ интерпретируются как отклик на деградацию многолетней мерзлоты и увеличение увлажнения. Голоценовый период характеризуется высокой продуктивностью и динамичностью. Полученные данные впервые представляют столь протяженную палеоэкологическую летопись в тысячелетнем масштабе для малых озер Еравнинской котловины, внося существенный вклад в детализацию палеогеографической истории Забайкалья и демонстрируя высокую чувствительность его озерных экосистем к глобальным климатическим трендам.

Ключевые слова: озеро Большое Еравное, стабильные изотопы, органическое вещество, гранулометрический состав, поздний плейстоцен, голоцен.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Германской службе академических обменов (DAAD) за предоставление стипендии Д. Б. Андреевой. Также мы благодарим Байройтский университет (Германия) за всестороннюю поддержку в проведении анализов. Исследования выполнены в рамках НИР ИОЭБ СО РАН № 121030100228-4.

Для цитирования

Андреева Д. Б., Цыбенков Ю. Б., Цех В. Реконструкция палеоэкологических условий по изотопным сигналам в донных отложениях озера Большое Еравное (Забайкалье) // Природа Внутренней Азии. Nature of Inner Asia. 2025. № 4(33). С. 68–78. DOI: 10.18101/2542-0623-2025-4-68-78

Введение

Донные отложения являются ценным палеоархивом, формирующим непрерывную летопись осадконакопления на протяжении всей истории озера. Содержащееся в них органическое вещество (ОВ) представляет собой сложную смесь соединений, образованных как автохтонными организмами, обитающими непосредственно в водной среде озера, так и аллохтонными источниками, поступающими извне. В последнее время для выявления источников ОВ применяется биохимическая реконструкция его исходного состава на основе соотношений стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) и азота ($\delta^{15}\text{N}$) с надежно датированными данными [Boutton, 1996; Andersson et al., 2012; Andreeva et al., 2011, 2013; Doyle et al., 2022].

Ключевым фактором природного варьирования изотопного состава углерода ($\delta^{13}\text{C}$) в ОВ является фракционирование изотопов в процессе фотосинтеза. Различия в механизмах фиксации углерода позволяют выделить три типа метаболизма растений: C3 (большинство деревьев и трав умеренного климата), C4 (растения засушливых зон) и САМ (суккуленты). Для характеристики ОВ озерных отложений апробирован комплекс индексов [Meyers, Ishiwatari, 1993]. К одним из таких индексов (приближенная оценка) относится соотношение C/N, используемое для разделения аллохтонных и автохтонных источников углерода. Автохтонное ОВ характеризуется значениями C/N в диапазоне 4–12, а для ОВ наземных растений — превышающими 15 [Meyers, 1994].

Дополнительным диагностическим параметром может служить индекс соотношения гранулометрических фракций 20–63/2–6 мкм, отражающий динамику гидродинамического режима озера. Послойное изменение распределения фракций по крупности отражает смену цикла высокой и низкой активности гидрологического режима седиментации.

Таким образом, комплекс получаемых данных дает возможность одновременно оценивать изменения климата и тип растительности, детально воспроизводя спектр факторов, влиявших на формирование осадков.

Комплексные подходы к изучению донных отложений успешно применяются во многих озерах Европы и Азии [Mackay et al., 2012; Dong et al., 2022; Prochnow et al., 2024]. Байкальский регион благодаря уникальной непрерывной осадочной

летописи озера Байкал, охватывающей изменения климата и природной среды Центральной Азии за последние 8 миллионов лет, также служит опорным объектом для палеоклиматических реконструкций в Сибири [30 лет программе «Байкал-бурение», 2020; Prokopenko et al., 2001; Demske et al., 2005; Безрукова и др., 2022; Fedotov et al., 2023]. Однако для решения ряда конкретных вопросов, требующих данные более высокого разрешения, чувствительных к кратковременным изменениям среды, в качестве ключевых объектов исследования привлекают малые озера. Эти водоемы в силу своих небольших размеров и глубины являются менее консервативными системами по сравнению с крупными и более чутко реагируют на быстрые климатические колебания.

На территории Юго-Восточной Сибири отложения малых озер изучались преимущественно с позиций палинологии, диатомового анализа и общей геохимии. К ним относятся озера Цаган-Тырм [Скляров и др., 2010], Арахлей [Решетова и др., 2013], Большие Тороки, Очки и Котокель [Леонова и др., 2019], Долгое [Солотчина и др., 2017], а также Черное, Духовое и Большое Еравное [Тарасов и др., 2002]. Возраст большинства полученных для этих озер осадочных записей не превышает 14 тыс. лет. Исключение составляют исследования керн оз. Котокель, послужившего основой для уникальной в регионе непрерывной (по диатомовым водорослям) реконструкции ландшафтов и климата за последние 48 тыс. лет [Bezrukova et al., 2010], а также керн оз. Баунт. Возраст основания последнего, установленный радиоуглеродным датированием, достигает 28–30 тыс. лет. Для этого разреза получены детальные петромагнитные записи и данные по содержанию биогенного кремнезема [Крайнов и др., 2018], а также вариации изотопов кислорода в диатомовом кремнеземе ($\delta O^{18}_{\text{диатом}}$) [Harding et al., 2020]. Тем не менее ни один из этих кернов не изучался с целью реконструкции природных условий по изотопным сигналам ОВ.

В данном контексте настоящее исследование обладает научной новизной, поскольку впервые для южной внутриконтинентальной территории Забайкалья представлена реконструкция природных условий по изотопу углерода ОВ в донных отложениях, охватывающая временной интервал около 38 тысяч лет — одну из наиболее продолжительных записей для малых озер Байкальского региона.

Цель работы — реконструкция природных условий озера Большое Еравное на основе вариаций изотопного состава органического вещества и гранулометрических характеристик его донных отложений.

Материал и методы

Объектом исследования выступили донные отложения озера Большое Еравное — крупнейшего водоема Еравнинской котловины с площадью 104 км² (рис. 1). Озеро характеризуется небольшой глубиной, не превышающей 5 м. Его донные отложения представлены осадками аллювиальной и озерно-аллювиальной фаций, которые слагают основную часть современного осадочного чехла квартера. Район исследования расположен в пределах Витимского плоскогорья (900–1 000 м над ур. м.) с резко континентальным климатом (среднегодовая температура составляет -4,1°C, осадки 300 мм). Геологическая основа котловины сложена магматическими и метаморфическими породами.



Рис. 1. Карта-схема оз. Большое Еравное и место отбора проб

Керн был отобран со льда озера в апреле 2015 г. с использованием ручного поршневого керноотборника. Длина керна составила 200 см при глубине воды в точке отбора 2,6 м. В полевых условиях пробы отбирались непрерывно с шагом 5 см для последующей лабораторной пробоподготовки.

Литологическое описание керна позволило установить следующую стратиграфическую последовательность (сверху вниз): верхние 50 см сложены темно-коричневыми сапропелями; в интервале 50–130 см залегают тонкослоистые алевриты темно-серого и зеленоватого оттенков; на глубине 130–170 см наблюдается чередование алевритовых слоев и прослоев мелкозернистого песка сероватого цвета с включениями гравия; основание керна (170–200 см) представлено плотными темно-серыми алевритами.

Для хронологической привязки было выполнено радиоуглеродное датирование ^{14}C методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS) на системе MICADAS в Бернском университете (Швейцария) [Szidat et al., 2014]. Использовались образцы ОВ, отобранные на глубинах 30, 130 и 195 см. Калибровка радиоуглеродных возрастов проведена по международной кривой IntCal20 с использованием программы Calib 8.2. [Reimer et al., 2020].

Гранулометрический состав определялся лазерно-дифракционным методом с помощью Analysette-22 (Fritsch, Германия) в Байройтском университете (Германия). Там же были определены общий углерод, азот на элементном анализаторе Vario EL (Elementar, Hanau) и их изотопный состав на масс-спектрометре Delta-S (IRMS) с интерфейсом Conow III (Thermo193 Finnigan MAT, Bremen). Изотопный состав углерода выражен в тысячных долях отклонения от международного стандарта ($\delta^{13}\text{C}\text{‰}$) и рассчитан по уравнению:

$$\delta (\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{образец}}}{R_{\text{стандарт}}} - 1 \right) \times 1000,$$

где R — изотопные отношения $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$.

Результаты и обсуждение

Керн донных отложений озера Большое Еравное, отобранный с южного побережья, охватывает хронологический интервал, оцениваемый по трем AMS ^{14}C -датировкам в 38,4 тыс. лет. Трех радиоуглеродных датировок недостаточно для построения непрерывной возрастной модели всего керна. Это объясняется сложным характером осадконакопления в Еравнинской котловине, где, вероятно, имели место перерывы в седиментации и существенно варьировали ее скорости из-за высокой чувствительности системы к климатическим колебаниям и изменениям уровня озера. Тем не менее полученные нами данные использованы для предварительной реконструкции хронологии осадконакопления в озере (рис. 2).

Слои озерных отложений обогащены органическим углеродом ($\text{C}_{\text{орг.}}$), содержание которого варьирует от 3,9 до 16,2%. Диапазоны значений отношения C/N (12–19) и $\delta^{13}\text{C}$ (–26,1...–19,5‰) отражают динамическую изменчивость аллохтонных и автохтонных пулов ОБ с различной степенью минерализации. Изотопный состав $\text{C}_{\text{орг.}}$ указывает на доминирование растительности С3-типа. Величина $\delta^{13}\text{C}$ для наземных С3-растений варьируют в пределах с –32 до –22‰, а для пресноводного фитопланктона с –35 до –20‰.

Соотношение фракций 20–63/2–6 мкм варьирует от 0,4 до 6,9 и свидетельствует о неоднородной гидродинамической активности в бассейне озера.

На основе комплексного анализа гранулометрического состава, содержания углерода и азота и их изотопных соотношений было выявлено несколько фаз осадконакопления, отражающих отклик экосистемы на климатические изменения.

Нижняя часть керна ~200 см (не достигающая фактического дна озера) сложена осадками каргинской стадии, которую ряд исследователей интерпретирует как климатический оптимум внутри позднеплейстоценового оледенения с относительно теплым и влажным климатом. Это подтверждается данными по высокой концентрации диатомей в кернах из озера Байкал [Prokopenko et al., 2001; Swann et al., 2005; Mackay et al., 2022], изотопным и спорово-пыльцевым составом из почв и отложений Байкальского региона [Воробьева и др., 2015; Kravchinsky et al., 2021; Tarasov et al., 2021; Голубцов и др., 2024]. Полученные нами данные также свидетельствуют, что нижние слои формировались в благоприятных условиях с участием древесно-кустарниковых растений. Вероятно, происходило заболачивание берегов озера с доминированием прибрежно-водной растительности. Об этом говорят повышенное содержание $\text{C}_{\text{орг.}}$ (5,1%), облегченное значение $\delta^{13}\text{C}$ (–26,1‰) и высокое отношение C/N (15) (рис. 2). Возможно, в каргинское время озеро имело границы, сходные с современными, не было полноводным, что подтверждается низким значением индекса фракций — 0,8, указывающим на спокойную гидродинамическую обстановку.

Вышележащий слой (190–180 см), вероятно, соответствует эпохе последнего ледникового оледенения плейстоцена (LGM). Значение соотношений фракций, равное 0,4, является самым низким во всей гранулометрической записи керна, что может указывать на длительный период ледового покрова. Как известно, ледовый покров подавляет развитие достаточно сильных течений в малых озерах, препятствуя переносу крупнозернистого материала [Asikainen et al., 2007]. Климат в этот период был холодным и сухим. Отношения C/N (16 и 15) указывают на

отсутствие существенных изменений в источниках ОВ, которыми на протяжении всего периода оставалась преимущественно наземная (древесно-кустарниковая) растительность. Однако наблюдаются некоторое утяжеление $\delta^{13}\text{C}$ (до -23‰) и снижение содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ (в среднем $4,5\%$), свидетельствующие о незначительном вкладе фитопланктона. Последний использует в метаболизме более тяжелый бикарбонат-ион (HCO_3^-), что связано со снижением концентрации растворенного CO_2 в воде.

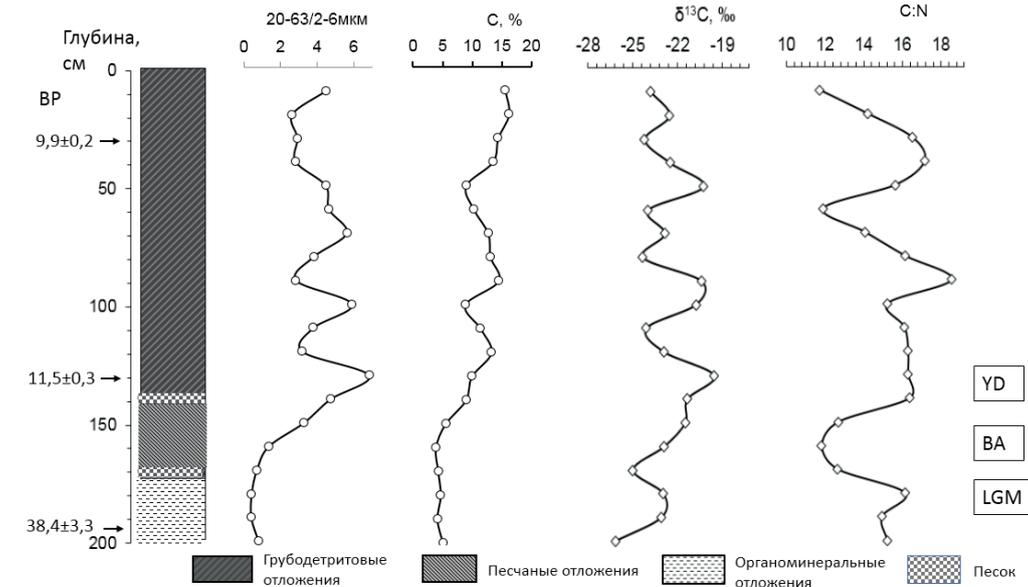


Рис. 2. Стратиграфическая колонка керна с основными геохимическими показателями донных отложений оз. Большое Еравное

В интервале глубин керна (170–140 см) наблюдается постепенный рост содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ и C/N . В отложениях данного интервала, маркирующего переход плейстоцен — голоцен, предположительно зафиксировано два климатических события: Аллеред (BA, ~160 см) и Поздний дриас (YD, ~140 см). Однако из-за отсутствия надежных радиоуглеродных датировок эта интерпретация остается неподтвержденной и основывается на косвенных данных нашего исследования. Некоторое смягчение и увлажнение климата в Еравнинской котловине около 13,9–12,7 тыс. лет назад, когда проявились вышеперечисленные кратковременные изменения климата Северного полушария, показывают данные палинологического анализа из археологической стоянки Красная Горка, расположенной на противоположной стороне озера Большое Еравное [Tsydenova, 2017]. Потепление подтверждается и нашими данными: о преобладании автохтонного ОВ свидетельствуют низкое отношение C/N (12) и изотопный сигнал $\delta^{13}\text{C}$ ($-22,9\text{‰}$), а также высокое содержание (более 70%) крупной фракции (> 63 мкм) песка. С потеплением увеличиваются количество атмосферных осадков и таяние многолетней мерзлоты, что в совокупности усиливает эрозионную активность и транспортирующую способность речных систем [Безрукова и др., 2022]. Утяжеление $\delta^{13}\text{C}$ наряду с наличием

грубообломочного материала может отражать не только увеличение продуктивности фитопланктона, но и интенсивное поступление в озеро бикарбонатных вод. Теплые события в начале переходного периода прерываются фазой похолодания — вероятно, поздним дриасом. Для этой фазы характерны утяжеление значений $\delta^{13}\text{C}$ (до $-21,3\text{‰}$) и резкое увеличение отношения C/N (до 16), что свидетельствует о преобладании аллохтонного источника ОВ. Изотопные сигналы позволяют предположить, что в холодных и аридных условиях вблизи озера доминировали кустарниковые и травянистые тундры с островками лесотундровой растительности. Аналогичная ситуация в растительных сообществах реконструирована для этого периода в Беклемишевской котловине Витимской таежно-плоскогорной провинции [Решетова и др., 2013].

Следующая фаза седиментации на глубине от 130 до 30 см соответствует раннему голоцену, которая в рамках нашего исследования привязана к хронологической шкале в интервале от 11,5 до 9,9 тыс. лет назад. Для данного интервала характерны лавинные скорости седиментации, которые обусловили интенсивный смыв ОВ с берегов в озерную котловину. Это, в свою очередь, привело к резкому росту биопродуктивности, что находит отражение в стабильно высоких значениях $C_{\text{общ}}$ в верхней части разреза, достигающих в среднем 12,5%. Для данной фазы характерна высокая динамика всех показателей. Значения $\delta^{13}\text{C}$ варьируют от $-24,3$ до $-20,2\text{‰}$, а соотношение C/N демонстрирует значительные колебания (от 12 до 19), что указывает на постоянную смену доминирующих источников ОВ — от автохтонного к аллохтонному и обратно. Гранулометрический состав остается стабильно высоким ($> 2,9$ с пиками до 6,9), что свидетельствует о сохранении активного гидродинамического режима и периодическом усилении эрозионных процессов. Эта нестабильность, вероятно, отражает климатическую изменчивость раннего голоцена с чередованием более влажных и аридных фаз, что в целом согласуется с палеоклиматической летописью Еравнинской котловины [Тарасов и др., 2002].

Таким образом, изученный керн представляет собой ценную, но прерывистую седиментационную летопись развития котловины за последние ~ 38 тыс. лет, требующую для детальной хроностратиграфической интерпретации дополнительных датировок, а также дополнительных (например, биомаркерных) анализов.

Заключение

Комплексный анализ изотопного состава, отношений C/N, $C_{\text{орг}}$ и гранулометрических характеристик донных отложений озера Большое Еравное позволил реконструировать природные условия Еравнинской котловины на протяжении около 38 тысяч лет. Полученная запись, охватывающая период от каргинского интерстадиала до среднего голоцена, позволила выделить четыре основные фазы осадконакопления.

Фаза каргинского интерстадиала (38,4 тыс. л. н.) характеризуется теплыми и влажными условиями, благоприятствовавшими поступлению аллохтонного ОВ с водосбора, что впервые фиксирует этот теплый этап в седиментации котловины.

Фаза последнего ледникового максимума (LGM) отражает холодные и аридные условия, выразившиеся в угнетении биопродуктивности и экстремально низкой

гидродинамической активности, указывающей на длительный и устойчивый ледовый покров.

Наиболее резкие изменения наблюдаются в переходной фазе от плейстоцена к голоцену, где скачкообразное усиление гидродинамической активности интерпретируется как прямой отклик на деградацию многолетней мерзлоты и увеличение увлажнения, а колебания источников ОВ соотносятся с кратковременными палеоклиматическими событиями (возможно, Аллерёд и Поздний дриас).

Голоценовая фаза отличается высокой динамичностью всех показателей, отражая чередование климатических режимов этого периода. На всем изученном интервале формирование ОВ происходило при доминировании растительности СЗ-типа, однако соотношение аллохтонных и автохтонных источников, а также активность седиментации существенно менялись, выступая надежными индикаторами смены палеоклиматических обстановок.

Таким образом, исследование значительно расширяет пространственный охват палеогеографических реконструкций в Байкальском регионе. Это свидетельствует о том, что мелководные внутриконтинентальные озера Забайкалья способны сохранять длительные и информативные летописи, которые чутко реагируют на глобальные климатические тренды. Полученные данные встраиваются в общерегиональную палеоклиматическую схему и подчеркивают необходимость дальнейшего поиска и изучения подобных протяженных озерных архивов.

Литература

1. 30 лет программе «Байкал-бурение» / ответственные редакторы М. И. Кузьмин, Е. В. Безрукова. Новосибирск : Гео, 2020. 367 с. Текст : непосредственный.
2. Безрукова Е. В., Крайнов М. А., Щетников А. А. Новые гранулометрические и петромагнитные записи из озерных отложений юга Восточной Сибири: применение для реконструкции природной среды в позднем ледниковье и голоцене // Геология и геофизика. 2022. № 5 С. 729–744. DOI 10.15372/GiG2020190. Текст : непосредственный.
3. Каргинский мегаинтерстадиал в Прибайкалье: почвообразование, осадконакопление / Г. А. Воробьева, Н. Е. Бердникова, Е. А. Липнина [и др.]. // Евразия в кайнозое. Стратиграфия, палеоэкология, культуры. 2015. Вып. 4. С. 58–71. Текст : непосредственный.
4. Голубцов В. А., Рыжов Ю. В., Черкашина А. А. Использование вариаций $\delta^{13}\text{C}$ органического вещества палеопочв Западного Забайкалья для реконструкции динамики атмосферного увлажнения позднеледниковья и голоцена // Почвоведение. 2024. № 7. С. 950–967. Текст : непосредственный.
5. Первые данные об установлении экскурсов Гетеборг и Моно Лейк в палеомагнитных записях из донных отложений озер забайкальского региона (на примере оз. Баунт) / М. А. Крайнов, Е. В. Безрукова, А. А. Щетников [и др.] // Доклады Академии наук. 2018. Т. 481, № 4. С. 407–409. DOI: 10.31857/S086956520001842-9. Текст : непосредственный.
6. Методический подход к выявлению источников и генезиса захороненного органического вещества в голоценовых разрезах озерных сапропелей (юг Западной Сибири и Восточное Прибайкалье) / Г. А. Леонова, Т. А. Копотева, В. Н. Меленевский [и др.] // Геология и геофизика. 2019. Т. 60, вып. 11. С. 1602–1626. Текст : непосредственный.
7. Растительность Центрального Забайкалья в позднеледниковье и голоцене / С. А. Решетова, Е. В. Безрукова, В. Паниззо [и др.] // География и природные ресурсы. 2013. № 2. С. 110–117. Текст : непосредственный.

8. Детальная летопись климата голоцена из карбонатного разреза соленого озера Цаган-Тырм (Западное Прибайкалье) / Е. В. Скляр, Э. П. Солотчина, Е. Г. Вологина [и др.] // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 3. С. 303–328. Текст : непосредственный.
9. Аутигенное карбонатообразование в озерах Еравнинской группы (Западное Забайкалье): отклик на изменения климата голоцена / Э. П. Солотчина, Е. В. Скляр, П. А. Солотчин [и др.] // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 11. С. 1749–1763. Текст : непосредственный.
10. Тарасов П. Е., Дорофеев Н. И., Виппер П. Б. Динамика растительности Бурятии в голоцене // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2002. Т. 10, № 1. С. 94–103. Текст : непосредственный.
11. Andersson R. A., Meyers P., Hornibrook E. et al. Elemental and Isotopic Carbon and Nitrogen Records of Organic Matter Accumulation in a Holocene Permafrost Peat Sequence in the East European Russian Arctic. *J. Quat Sci.* 2012. 27: 545–552.
12. Andreeva D., Leiber K., Glaser B. et al. Genesis and Properties of Black Soils in Buryatia, Southeastern Siberia, Russia. *Quaternary Int.* 2011. Vol. 243. DOI: 10.1016/j.quaint.2010.12.017
13. Andreeva D., Zech M., Glaser B. et al. Stable Isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$) Record of Soils in Buryatia, Southern Siberia: Implications for Biogeochemical and Paleoclimatic Interpretations. *Quaternary International.* 2013. Vol. 290–291: 82–94. DOI: 10.1016/j.quaint.2012.10.054
14. Asikainen C.A., Francus P., Brigham-Grette J. Sedimentology, Clay Mineralogy and Grain-Size as Indicators of 65 ka of Climate Change from El'gygytyn Crater Lake, Northeastern Siberia *J. Paleolimnol.* 2007; 37: 105–121.
15. Bezrukova E. V., Tarasov P. E., Solovieva N. et al. Last Glacial–Interglacial Vegetation and Environmental Dynamics in Southern Siberia: Chronology, Forcing and Feedbacks. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* 2010; 296: 185–198.
16. Boutton T. W. Stable Carbon Isotope Ratios of Soil Organic Matter and Their Use as Indicators of Vegetation and Climate Change. *Mass Spectrometry of Soils* / Eds.: T. W. Boutton, S.-I. Yamasak, Marcel Dekker. New York, 1996. P. 47–82.
17. Demske D., Heumann G., Granoszewski W. et al. Late Glacial and Holocene Vegetation and Regional Climate Variability Evidenced in High-Resolution Pollen Records from Lake Baikal. *Global and Planetary Change.* 2005; 46(1–4): 275–279. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.09.020>
18. Dong H., Xie M., Shang, W. et al. Plant-Wax Carbon Isotopic Evidence of Lateglacial and Holocene Climate Change from Lake Sediments in the Yin Mountains, Inner Mongolia. *Quat. Int.* 2022; 622: 10–20. DOI: 10.1016/j.quaint.2021.12.017
19. Doyle R. M., Longstaffe F. J., Moser K. A. An Isotope, Elemental, and n-alkane Baseline for Organic Matter Sources in Sediments of High-Altitude Lakes in the Uinta Mountains, Utah, USA. *J. Paleolimnol.* 2022; 69: 123–139. <https://doi.org/10.1007/s10933-022-00265-6>
20. Fedotov A. P., Trunova V. A., Stepanova O. G. et al. Changes in Patterns of Mineral and Chemical Elements in Bottom Sediments of Lake Baikal (Russia) as High-Resolution Records of Moisture for the Past 31–16 ka BP. *Quat. Int.* 2023; 644–645: 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.05.026>.
21. Harding P., Bezrukova E. V., Kostrova S. S. et al. Hydrological (in) Stability in Southern Siberia during the Younger Dryas and Early Holocene *Global and Planetary Change.* 2020; 195: 103333. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103333>.
22. Kravchinsky V., Zhang R., Borowiecki R. et al. Centennial scale climate oscillations from southern Siberia in the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews.* 2021. 270: 107171. [10.1016/j.quascirev.2021.107171](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107171).
23. Mackay A., Bezrukova E., Leng M. et al. Aquatic Ecosystem Responses to Holocene Climate Change and Biome Development in Boreal, Central Asia. *Quat. Sci. Rev.* 2012; 41: 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.03.004>

24. Mackay A., Felde A., Morley V. et al. Long-Term Trends in Diatom Diversity and Palaeoproductivity: a 16 000-year Multidecadal Record from Lake Baikal, Southern Siberia. *Climate of the Past*. 2022. 18(2): 363–380. DOI: 10.5194/cp-18-363-2022.
25. Meyers P. A. Preservation of Elemental and Isotopic Source Identification of Sedimentary Organic Matter. *Chem. Geol.* 1994. 114: 289–302. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90059-0)
26. Meyers P. A., Ishiwatari R. Lacustrine Organic Geochemistry — An Overview of Indicators of Organic Matter Sources and Diagenesis in Lake Sediments. *Org. Geochem.* 1993. 20: 867–900. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(93\)90100-P](https://doi.org/10.1016/0146-6380(93)90100-P)
27. Prochnow M., Dulias K., Strobel P. et al. Paleohydrology and Human Driven Paleoproductivity during the Late Holocene from Schliersee, Bavaria. *Quaternary Sci.* 2024: 345: 109012. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2024.109012>.
28. Prokopenko A. A., Karabanov E. B., Williams D. F. et al. The Detailed Record of Climatic Events during the Past 75,000 yrs BP from the Lake Baikal drill core BDP-93-2. *Quaternary International*. 2001; 80–81: 59–68.
29. Reimer P. J. et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration Curve (0–55 calkBP). *Radiocarbon*. 2020; 62: 4. DOI: 10.1017/RDC.2020.41
30. Swann G. E., Mackay A. W., Leng M. J. et al. Climatic Change in Central Asia during MIS 3/2: A Case Study using Biological Responses from Lake Baikal. *Global and Planetary Change*. 2005; 46: 235–253.
31. Szidat S., Salazar G. A., Vogel E. et al. ¹⁴C Analysis and Sample Preparation at the New Bern Laboratory for the Analysis of Radiocarbon with AMS (LARA). *Radiocarbon*. 2014; 56: 561–566. <https://doi.org/10.2458/56.17457>.
32. Tarasov P. E., Leipe C., Wagner M. Environments During the Spread of Anatomically Modern Humans across Northern Asia 50–10 cal kyr BP: What Do We Know and What Would We Like to Know?. *Quaternary International*. 2021; 596: 155–170.
33. Tsydenova N., Andreeva D., Zech W. Early Pottery in Transbaikalia Siberia: New Data from Krasnaya Gorka. *Quaternary International*. 2017; 441: 81–90.

Статья поступила в редакцию 18.10.2025; одобрена после рецензирования 21.11.2025; принята к публикации 10.12.2025.

RECONSTRUCTION OF PALEOECOLOGICAL CONDITIONS
FROM ISOTOPIC SIGNALS IN BOTTOM SEDIMENTS
OF LAKE BOLSHOYE ERAVNOYE (TRANSBAIKALIA)

D. B. Andreeva, Yu. B. Tsybenov, W. Zech

Darima B. Andreeva

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher,
Institute of General and Experimental Biology SB RAS
6 Sakhyanovoy St., Ulan-Ude 670047, Russia
darima.andreeva@gmail.com

Yury B. Tsybenov

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher,
Institute of General and Experimental Biology SB RAS
6 Sakhyanovoy St., Ulan-Ude 670047, Russia
jur-cybenov@rambler.ru

Wolfgang Zech

Dr. Sci. (Biol.), Professor,
University of Bayreuth
30 University St., Bayreuth 95440, Germany
w.zech@uni-bayreuth.de

Abstract. Paleocological reconstructions for the intracontinental regions of Transbaikalia are crucial for understanding ecosystem responses to global climatic changes. The study presents the results of a comprehensive analysis of a sediment core (2 m) from Lake Bolshoye Eravnoye (Eravninskaya Basin). Based on three AMS ^{14}C dates, the core sample spans a period of approximately 38 thousand years, making it one of the longest temporal records for shallow lakes in the region. Analysis of elemental and isotopic composition along with grain-size distribution allowed for the identification of four sedimentation phases that reflect the ecosystem's response to shifts in climatic conditions. The findings demonstrate that during warm and humid periods, allochthonous organic matter dominated ($\text{C/N} = 15\text{--}19$, $\delta^{13}\text{C}$ from -26.1 to -24.0‰). In contrast, cold and arid phases (Last Glacial Maximum) were marked by an increased role of autochthonous organic matter with minimal hydrodynamic activity attributed to persistent ice cover. The most pronounced environmental changes occurred at the Pleistocene-Holocene transition: a sharp increase in hydrodynamic energy and a shift in organic matter sources are interpreted as a response to permafrost degradation and increased moisture availability. The Holocene section of the record is characterized by high productivity and dynamism, reflecting the climatic instability of this period. The data presented provide, for the first time, such a long and detailed paleocological record for small lakes of the Eravninskaya Basin. This significantly contributes to refining the paleogeographic history of Transbaikalia and underscores the high sensitivity of its lake ecosystems to global climatic trends.

Keywords: Lake Bolshoye Eravnoye, stable isotopes, organic matter, 20–63/2–6 μm fractions, Late Pleistocene, Holocene.

Acknowledgements

The authors acknowledge the German Academic Exchange Service (DAAD) for a scholarship awarded to D. B. Andreeva. We are also grateful to the University of Bayreuth (Germany) for its comprehensive support in performing the analyses. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of General and Experimental Biology SB RAS (project No. 121030100228-4).

For citation

Andreeva D. B., Tsybenov Yu. B., Zech W. Reconstruction of Paleocological Conditions from Isotopic Signatures in Bottom Sediments of Lake Bolshoye Eravnoye (Transbaikalia). *Nature of Inner Asia*. 2025; 4(33): 68–78 (In Russ.). DOI: 10.18101/2542-0623-2025-4-68-78

The article was submitted 18.10.2025; approved after reviewing 21.11.2025; accepted for publication 10.12.2025.