

УДК 551.8.89:551.312:4:556.55(571.151)

ХРОНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗЕРНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА–ГОЛОЦЕНА НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА ВЕРХНИЕ БОГУТЫ, ЮГО-ВОСТОЧНЫЙ АЛТАЙ[#]

© 2025 г. Р. К. Непоп^{1, 2, *}, А. Р. Агатова^{1, 2, **}, А. Р. Непоп^{3, ***}, О. Б. Кузьмина^{4, ****},
С. В. Жилич^{5, *****}

¹Институт геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

²Уральский Федеральный Университет имени Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³Яндекс. Технологии, Москва, Россия

⁴Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

⁵Институт археологии и этнографии СО РАН, Новосибирск, Россия

*E-mail: agatr@mail.ru

**E-mail: agat@igm.nsc.ru

***E-mail: arnepop@yandex-team.ru

****E-mail: kuzminaob@ipgg.sbras.ru

*****E-mail: snezhy@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.03.2025 г.

После доработки 05.05.2025 г.

Принята к публикации 20.06.2025 г.

При изучении озерных осадочных летописей позднего плейстоцена–голоцена по кернам донных отложений хронологическая привязка анализируемых характеристик производится с помощью глубинно-возрастной модели (ГВМ), в подавляющем большинстве случаев построенной по результатам радиоуглеродного датирования. Как правило, измеренная величина сопоставляется со средним либо медианным значением ¹⁴C-возраста соответствующего сантиметра керна, что обеспечивает перенос данных со шкалы глубин осадочного разреза на шкалу календарного времени “точка в точку” т. е., казалось бы, без потери точности. Однако в действительности такой подход игнорирует вероятностный характер определения календарного возраста и может приводить к ошибочным хронологическим реконструкциям или завышению их точности. Нами предлагается подход, который учитывает функцию плотности вероятности рассчитываемого по ГВМ календарного возраста при хронологической привязке измеряемых в керне параметров и позволяет избежать этих ошибок. На примере позднплейстоцен–голоценовых донных отложений озера Верхние Богуты, расположенного в высокогорной Богутинской впадине на юго-востоке Русского Алтая, показана разница в результатах применения обоих подходов для хронологической привязки данных антракологического и спорово-пыльцевого анализов керна. Анализируемые характеристики осадка – скорость накопления микроскопических фрагментов углей (CHAR) и процентное содержание пыльцы древесной растительности в спорово-пыльцевых спектрах – относятся к принципиально разным типам данных. Они отличаются характером выборки (дискретным / условно непрерывным), вариабельностью измеряемых численных величин и наличием или отсутствием в выборке нулевых значений. Показано, что хронологическую привязку обоих типов данных необходимо проводить с учетом плотности вероятности рассчитываемого по ГВМ календарного возраста. Еще одним условием точности привязки является корректная интерпретация нулевых значений измеряемых величин, что особенно важно при работе с дискретной выборкой. Нулевые значения могут быть как истинными, отражая реальные изменения природной среды в прошлом, так и являться следствием пропуска или невозможности определения конкретного параметра в незначительном по объему образце осадка. В каждом случае исследователь должен делать соответствующий выбор с привлечением дополнительной информации. В целом, точность хронологической привязки анализируемых характеристик озерных

[#] Ссылка для цитирования: Непоп Р. К., Агатова А. Р., Непоп А. Р., Кузьмина О. Б., Жилич С. В. (2025) Хронологическая интерпретация характеристик озерных отложений позднего плейстоцена–голоцена на примере озера Верхние Богуты, юго-восточный Алтай. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 56. № 4. С. 701–712. <https://doi.org/10.7868/S2949179725040085>

отложений и достоверность последующей палеогеографической реконструкции определяется прежде всего качеством ГВМ, а предлагаемый подход позволяет понимать ограничения и детальность этих реконструкций.

Ключевые слова: донные отложения; радиоуглеродный анализ; глубинно-возрастная модель; функция плотности вероятности; палеогеографические реконструкции

DOI: 10.7868/S2949179725040085

1. ВВЕДЕНИЕ

Во всех хронологически ориентированных естественнонаучных дисциплинах время является фундаментальным параметром. Организация в хронологическом порядке и установление длительности событий, записанных в отложениях и формах рельефа, необходимы для понимания причинно-следственных связей между ними. При этом ключевым моментом палеогеографических реконструкций является достоверная привязка измеряемых в образцах природных материалов физических величин и иных характеристик к календарной шкале времени. Донные отложения озер представляют собой один из наиболее полных и подробных природных архивов экологических и климатических изменений. При изучении кернов озерных отложений позднелейстоцен–голоценового возраста основным методом хронологической привязки запечатленных в них природных событий является радиоуглеродное датирование органического материала (рассеянного и/или представленного в виде включений) и последующее построение глубинно-возрастной модели (ГВМ) осадконакопления в специализированных программных продуктах. Результатом такого моделирования является рассчитываемый возраст осадка, который, как правило, соотносят с каждым сантиметром вскрытого скважиной геологического разреза, что дает возможность в дальнейшем проводить хронологическую привязку и корреляцию измеряемых в образцах керна характеристик отложений. Иными словами, это обеспечивает перенос данных со шкалы глубин на шкалу календарного времени.

Как и в случае с обычными калиброванными радиоуглеродными датами, рассчитываемый по ГВМ возраст конкретной точки осадочного разреза характеризуется диапазоном возможных значений календарного возраста, ширина которого определяется доверительным интервалом при калибровке (1σ или 2σ). Как правило, измеряемую величину/характеристику осадка сопоставляют со средним либо медианным значением возраста (определенным по ГВМ) для соответствующего сантиметра керна, и таким способом — “точка в точку” — все данные со шкалы глубин соотносят со шкалой календарного времени, после чего они могут быть подвергнуты дополнительно обработке, например,

процедурами сглаживания. Подразумевается, что таким образом возрастная привязка происходит без потери точности. Однако в действительности этот подход игнорирует вероятностный характер определения календарного возраста радиоуглеродным методом и может приводить к ошибочным хронологическим реконструкциям или завышению их точности. Так, фиксируемые на шкале глубин в осадочном разрезе четкие границы природных событий при переносе на шкалу времени вследствие широкого интервала возможных значений возраста по ГВМ имеют “размытый” характер. Сглаживание в данном случае является менее корректной процедурой при хронологических реконструкциях по сравнению с использованием функции плотности вероятности рассчитываемого по ГВМ календарного возраста осадка. Другой сложностью при хронологической привязке анализируемых параметров донных отложений является зачастую дискретный характер измерений, а также наличие нулевых значений измеряемой характеристики. Последние могут интерпретироваться не только как “ноль”, т. е. реальное отсутствие анализируемого параметра на данной глубине в осадочном разрезе, но, в том числе, и как ненахождение или невозможность его измерения в конкретном, очень небольшом по объему образце керна.

В данной статье мы обсуждаем обозначенные проблемы общепринятого подхода к хронологической привязке характеристик донных отложений озер и предлагаем альтернативный подход, учитывающий функцию плотности вероятности рассчитываемого по ГВМ календарного возраста осадка. Обоснование преимуществ этого “вероятностного” подхода проводится на примере привязки к абсолютной шкале времени данных спорово-пыльцевого и антракологического анализов керна донных отложений моренно-подпрудного озера Верхние Богуты. Разрез мощностью до 4.71 м представляет собой самую высокогорную (2470 м над у. м.) и продолжительную (~24 тыс. лет) осадочную летопись для сопредельных районов Алтая, Тувы и Монголии (Agatova et al., 2024). Озеро расположено в Богутинской впадине в наиболее аридной юго-восточной части Русского Алтая (рис. 1).

Перекрытая крупноглыбовыми моренами впадина абсолютно безлесна, тем не менее, находки

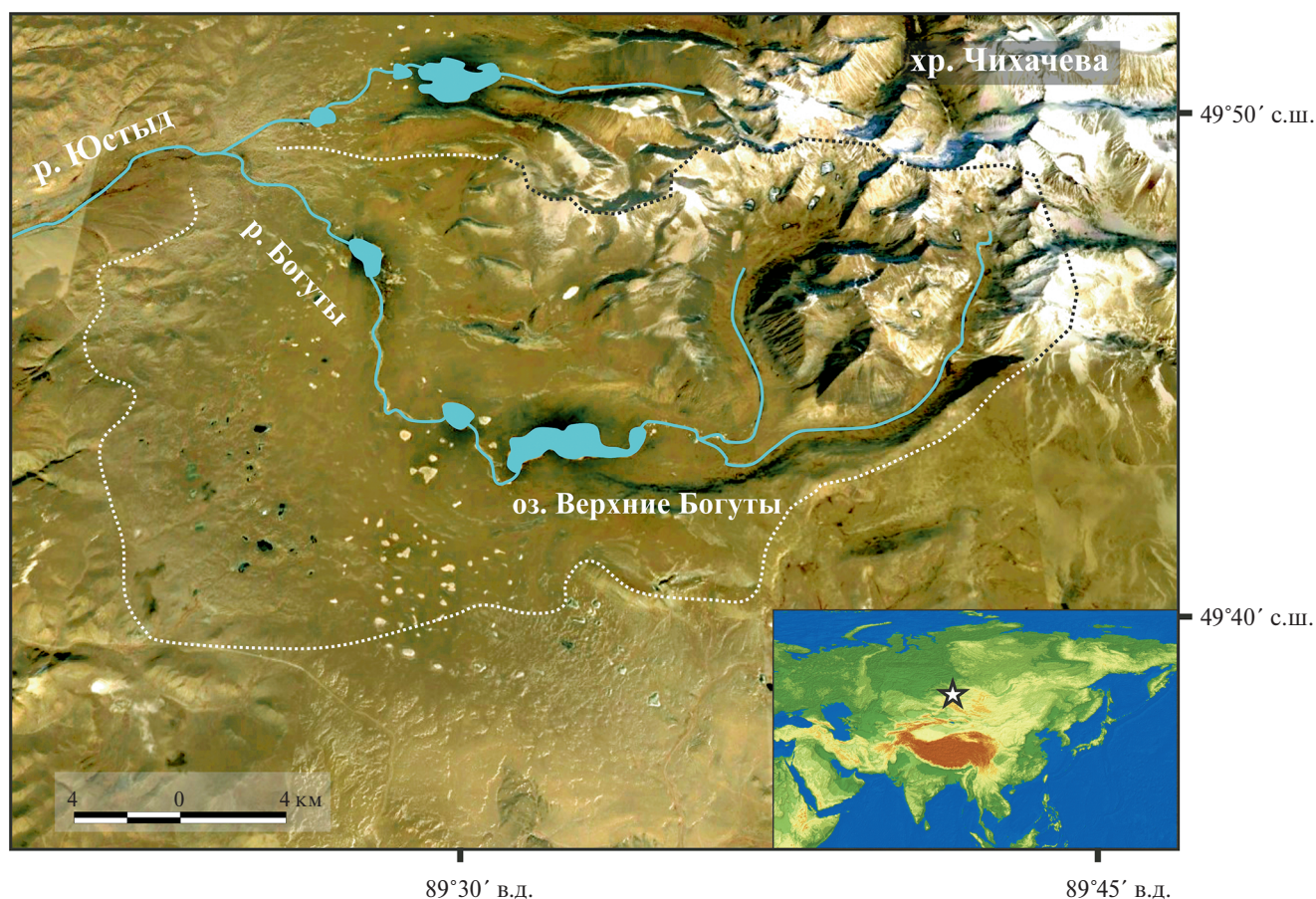


Рис. 1. Район исследований. Высокогорная Богутинская впадина (снимок из базы данных Google Earth), расположенная у подножия юго-западного макросклона хребта Чихачева.

Fig. 1. Study area. The high-mountain Boguty Depression (Google Earth image) located at the foot of the southwestern slope of the Chikhachev Ridge.

крупных древесных углей, устьиц и слаболетучей пыльцы *Larix sibirica* в пост-ледниковых почвенно-седиментационных последовательностях свидетельствуют о распространении здесь лиственничников и лесных пожарах в первой половине голоцена (Бутвиловский, 1993; Бронникова и др., 2018; Agatova et al., 2018; Nepor et al., 2020). В рамках изучения изменений климата и эволюции ландшафтов высокогорий юго-восточного Алтая в конце последнего ледникового максимума—голоцене, для реконструкции времени произрастания и исчезновения древесной растительности в Богутинской впадине были привлечены антракологический и спорово-пыльцевой анализы донных отложений озера Верхние Богуты. Что, в свою очередь, привело нас к обсуждению проблем точности хронологической привязки результатов аналитических исследований с помощью глубинно-возрастных моделей, построенных по результатам радиоуглеродного анализа.

2. ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ АНАЛИТИЧЕСКИХ ДАННЫХ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПО КЕРНАМ ОЗЕРНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Анализ содержания микроскопических фрагментов углей в озерных отложениях среди прочих методов используют для палеоландшафтных и палеоэкологических реконструкций (Mustaphi, Pisaric, 2014; Feurdean et al., 2017). Выделенные угли после стандартной пробоподготовки разделяют на размерные классы и определяют до морфотипа (дерево, трава, листья, корни и т. д.). В целях интересующей нас реконструкции распространения древесной растительности в Богутинской впадине в непосредственной близости от озера Верхние Богуты особый интерес представляли микроскопические фрагменты древесных углей максимального размера — 500 мкм и более, которые, в отличие от мелких фракций, не подвержены дальнейшему переносу. Результат измерений фиксировался в виде вели-

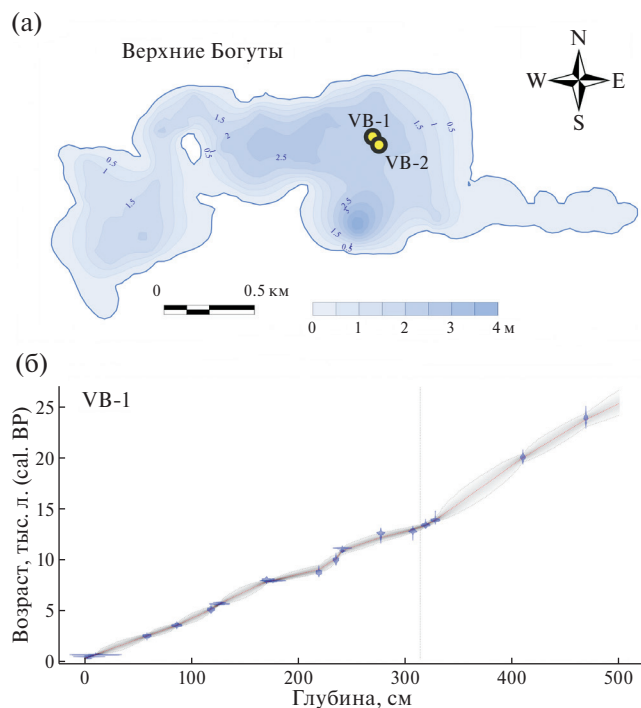


Рис. 2. Ранее полученные результаты исследования озера Верхние Богуты (Agatova et al., 2024): (а) — результаты батиметрической съемки и положение пробуренных скважин; (б) — глубинно-возрастная модель осадконакопления, построенная по керну из скважины VB-1.

Fig. 2. Previously obtained results for the Upper Boguty Lake (Agatova et al., 2024): (a) — results of a bathymetric survey and location of wells; (b) — depth-age model based on the core data from well VB-1.

чины CHAR (Charcoal Accumulation Rate) — скорости накопления микроскопических фрагментов углей, измеряемой в шт/год/см² (Whitlock, Larsen, 2002).

Был проведен анализ 49 образцов в интервале глубин 4–321 см. Каждый образец имел навеску 0.5–2 г, отобранную из отложений мощностью 1 см. Изначально опробование проводилось с шагом около 10 см. После получения предварительных результатов плотность пробоотбора для некоторых интервалов глубин была увеличена. Тем не менее, результаты этого анализа в нашем исследовании представляют собой скорее набор дискретных величин, чем непрерывную последовательность измерений.

Образцы для спорово-пыльцевого анализа (2–5 г сухого вещества) также отбирались из отложений мощностью 1 см, но скратно меньшим шагом пробоотбора, составлявшим 2–3 см. После пробоподготовки по стандартной методике (Faegri, Iversen, 1989) осуществлялся подсчет пыльцевых зерен в количестве не менее 300 в каждом образце

и определение их таксономической принадлежности. Среди пыльцы древесных пород особое внимание уделялось, прежде всего, пыльцевым зернам *Larix*, дальность разноса которых от дерева-производителя из-за отсутствия воздушных мешков не превышает первые сотни метров, вследствие чего такие находки указывают на произрастание лиственницы в непосредственной близости от места бурения. Тем не менее, для демонстрации различий в общепринятом и предлагаемом нами подходах, используемых при хронологической привязке разных типов характеристик озерного осадка, ниже мы рассматриваем выборку пыльцевых зерен всех древесных растений.

В контексте обсуждаемой проблемы корректного переноса данных со шкалы глубин на шкалу календарного времени важно подчеркнуть, что величина CHAR и процентное содержание пыльцы древесной растительности в спорово-пыльцевых спектрах представляют собой различные типы данных. Величина CHAR вследствие меньшей плотности пробоотбора охарактеризована скорее дискретно, т. е. представляет собой отдельные измерения, в противовес относительно непрерывно определяемому по разрезу процентному содержанию пыльцы. Кроме того, эти типы данных отличаются и вариабельностью значений. В анализируемом интервале глубин процентное содержание пыльцы древесных плавно меняется в пределах 40%, тогда как при значительно меньшей плотности отбора образцов наблюдаются кратное изменение, а также многочисленные нулевые значения величины CHAR. Последнее обстоятельство требует отдельного анализа при хронологических интерпретациях, о чем также речь пойдет ниже.

3. ОСОБЕННОСТИ ХРОНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГВМ: ДВА ПОДХОДА

Хронологическая привязка анализируемых характеристик донных отложений озера Верхние Богуты проводилась с использованием построенной ранее глубинно-возрастной модели (рис. 2) (Agatova et al., 2024). В ходе исследований была проведена оценка величины пресноводного резервуарного эффекта в озере и установлено ее изменение во времени. В данной работе мы не обсуждаем влияние этого эффекта на точность хронологических реконструкций, а уделяем внимание, прежде всего, особенностям применения для этой цели глубинно-возрастных моделей и вероятностному характеру лежащих в их основе определений календарного возраста методом радиоуглеродного датирования. Сравнение двух подходов к хронологической интерпретации обеих измеряемых по

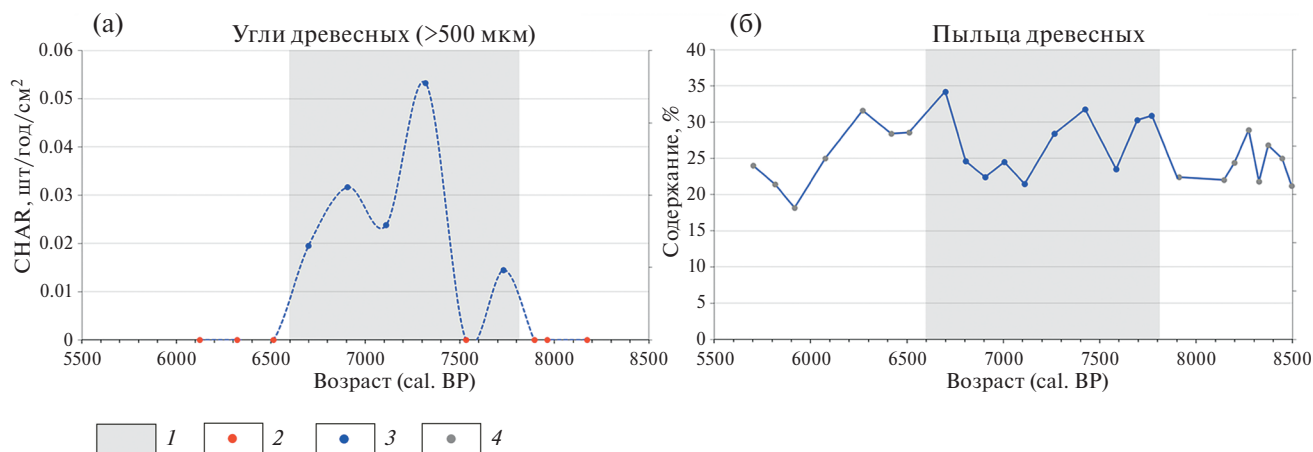


Рис. 3. Хронологическая привязка значений скорости аккумуляции древесных углей крупной (>500 мкм) фракции (а) и процентного содержания пыльцы древесных растений (б) в интервале глубин 134–184 см с использованием “традиционного” подхода.

1 – целевой интервал календарного времени, внутри которого для данной выборки возможна корректная хронологическая интерпретация с учетом вероятностного характера определения возраста по ГВМ; 2 – нулевые значения анализируемого параметра; 3 – значения, попадающие в целевой интервал; 4 – значения, не попадающие в целевой интервал, но при использовании “вероятностного” подхода влияющие на расчетные характеристики внутри этого интервала.

Fig. 3. Chronological interpretation of the CHAR values (accumulation rate of large (>500 μm) fragments of charcoal) (a) and the content of pollen of woody vegetation (б) in the depth interval of 134–184 cm applying the “traditional” approach.

1 – The target interval of calendar where a correct chronological interpretation is possible, taking into account the probabilistic nature of age determination according to the DAM; 2 – zero values of the analyzed parameter; 3 – values falling within the target interval; 4 – values that do not fall within the target interval, but when using the “probabilistic” approach affect the calculated characteristics.

керну характеристик проведено в интервале глубин 134–184 см, где отчетливо проявлены отмеченные выше различия двух типов данных (относительно непрерывное и плавно меняющееся процентное содержание пыльцы древесных и дискретные, кратно меняющиеся значения величины CHAR с множественными нулевыми значениями). Средние возрасты отложений на верхней и нижней границах этого интервала, определенные по глубинно-возрастной модели, составили 6123 и 8197 кал. л. соответственно. Однако, как будет показано ниже, корректные реконструкции, учитывающие вероятностный характер моделируемого по ГВМ календарного возраста для этого интервала глубин, возможны в более узком временном интервале – 6600–7800 кал. л.

3.1. Общепринятый подход

В настоящий момент перенос измеряемых по разрезу характеристик донных отложений со шкалы глубин на шкалу календарного времени зачастую производят по средним либо медианным значениям возраста, получаемым из ГВМ (рис. 3). Иными словами, каждому значению измеряемой величины из конкретного сантиметра керна ставится в соответствие средний (с точностью до года) радиоуглеродный возраст для этого сантиметра, рассчитанный

по глубинно-возрастной модели. Таким образом, перенос осуществляется “точка в точку”, и подразумевается, что он происходит без потери точности. В случае привязки описанным способом величины CHAR, последующие хронологические реконструкции проводят, как правило, путем сглаживания с использованием скользящего среднего (Kelly et al., 2011). В случае хронологической интерпретации данных палинологического анализа сглаживание, как правило, не проводят в связи с непрерывным характером и относительной монотонностью значений (по сравнению с дискретными и переменными значениями CHAR). При таком подходе не рассматриваются и значения характеристик осадка на соседних участках керна, расположенных рядом с анализируемым интервалом глубин, так как при переносе на шкалу времени “точка в точку” они не оказывают никакого влияния на значения, получаемые внутри самого интервала. Иными словами, обнаружение какого-то количества пыльцевых зерен или углей в определенном сантиметре керна никак не влияет на хронологическую интерпретацию этих параметров, определенных в соседнем сантиметре вскрытого разреза.

Однако переход к хронологическому анализу измеряемых по разрезу параметров только на ос-

новании средних значений возраста по ГВМ является серьезным упрощением. Такой подход, хотя и является общепринятым, игнорирует вероятностный характер рассчитываемого по ГВМ календарного возраста и может приводить не только к ложному представлению о точности хронологических реконструкций, но и, в некоторых случаях, к искажению выявляемых зависимостей. Как будет показано ниже, во избежание этих ошибок анализ изменений различных характеристик донных отложений во времени следует проводить с учетом плотности вероятности рассчитываемого по ГВМ календарного возраста.

Отметим, что интервал рассчитываемых по ГВМ значений возможного календарного возраста донных отложений, как правило, получается достаточно широким. Это обусловлено тем, что материал для датирования зачастую представляет собой смесь различного органического вещества, содержащегося в осадке (bulk), и, соответственно, определяется возраст всего органического углерода в образце (ТОС – total organic carbon). При этом в ходе осадконакопления возможно смешение углерода разного возраста, что особенно критично для датирования с использованием ускорительной масспектрометрии (УМС), скорость осадконакопления непостоянна, возможны перерывы в осадочной летописи, присутствует резервуарный эффект и т. д. Кроме того, при калибровке полученной радиоуглеродной даты на ширину временного интервала может влиять наличие плато на калибровочной кривой. Так, согласно ГВМ, построенной для озера Верхние Богуты, для отложений с глубины 43 см с медианным значением возраста 1980 кал. л. (2 σ) разброс возможных календарных дат превышает 900 лет. Иными словами, точность определения календарного возраста осадка в данной точке (а точнее, в данном сантиметре) разреза превышает продолжительность Исторической стадии¹, во время которой предположительно происходило его накопление. Схожий разброс минимального и максимального возрастов осадка фиксируется по ГВМ и на начало голоцена (~240 см керна). Как правило, с увеличением возраста осадка за счет его уплотнения и контаминации разновозрастных слоев абсолютное значение погрешности радиоуглеродных дат, по которым рассчитывается ГВМ, возрастает, что приводит к уменьшению точности модели. В целом, для более точного моделирования необходима как можно большая плотность отбора образцов на радиоуглеродное датирование.

¹ Одна из стадий подвижек горно-долинных ледников ЮВ Алтая в голоцене, длительность которой, по нашим реконструкциям, составляла около 600 лет (Agatova et al., 2021).

Приведенный пример наглядно демонстрирует значительный разброс моделируемого для каждой точки разреза календарного возраста отложений, который необходимо учитывать при хронологических интерпретациях определяемых по разрезу характеристик осадка.

3.2. Альтернативный подход, учитывающий вероятностный характер определения возраста осадка

Предлагаемый в данной работе альтернативный подход позволяет учесть вероятностный характер определения возраста озерного осадка. Для этого из рассчитанной ГВМ выгружается функция плотности вероятности календарного возраста для нужного сантиметра керна. Произведение плотности вероятности и величины анализируемого параметра (CHAR или процентное содержание пылицы древесных растений) на конкретной глубине дает распределение параметра во времени. Далее уже на шкале календарного времени для каждой точки производится суммирование ненулевых значений анализируемого параметра с учетом функции плотности вероятности. Полученная интегральная кривая представляет собой корректную хронологическую интерпретацию измеряемой в керне характеристики. Ее нормирование позволяет в дальнейшем работать уже с функцией плотности вероятности этого параметра.

Описанный алгоритм был реализован в виде скрипта Python в среде RStudio®, где проводилось построение глубинно-возрастной модели донного осадка озера Верхние Богуты с использованием 17 радиоуглеродных дат, полученных по общему органическому углероду (ТОС). Функция плотности вероятности рассчитываемого календарного возраста для каждого сантиметра осадочного разреза задавалась в виде массива из 3700 значений возраста. Далее данные группировались по кластерам с определенным шагом по времени, который можно задавать при запуске программы. Дальнейшие расчеты проводились автоматически с возможностью выгрузки результатов в ПО Excel® и их визуализацией.

Проиллюстрируем предлагаемый нами “вероятностный” подход на примере хронологической интерпретации параметра CHAR для донных отложений на том же интервале глубин (134–184 см) из центральной части разреза, вскрытого скважиной № 1 (рис. 4). В образце осадка с глубины 158 см были обнаружены микроскопические фрагменты древесных углей и рассчитана величина CHAR, составившая 0.0532 (шт/год/см² на грамм сухого вещества). Медианный возраст осадка для этой глубины по построенной ГВМ составляет 7319 кал. л. (при минимальном и максимальном значениях

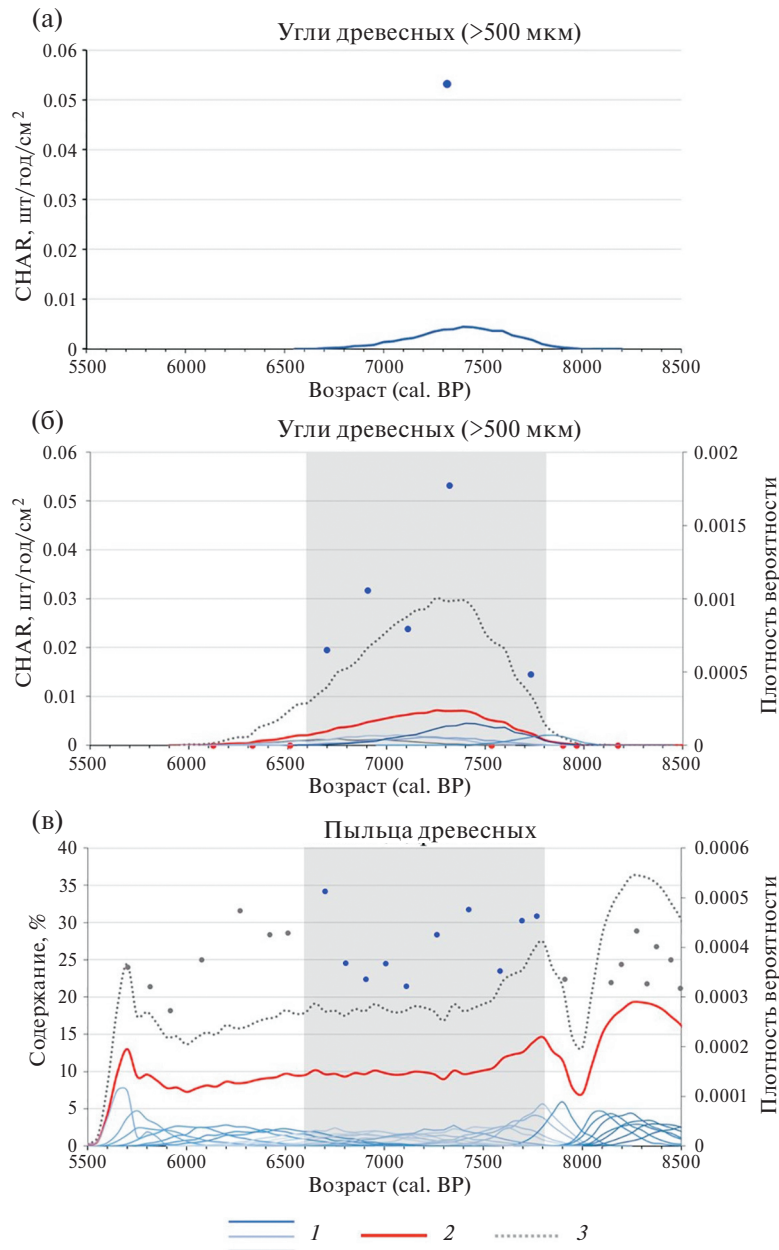


Рис. 4. Алгоритм учета неопределенности рассчитываемого по ГВМ календарного возраста при хронологической привязке значений скорости аккумуляции древесных углей крупной фракции (а, б) и процентного содержания фракции пыльцы древесной растительности (в), полученных по керну донных отложений озера Верхние Богуты. Усл. обозначения см. рис. 3.

1 – кривые, отражающие распределение отдельных измеряемых величин в соответствии с функциями плотности вероятности календарного возраста из ГВМ; 2 – интегральная кривая, отражающая распределение суммарного значения этих величин на временной шкале; 3 – нормированная интегральная кривая, отражающая плотность вероятности обнаружения измеряемой величины на шкале времени.

Fig. 4. Procedure of calculating the uncertainty of the calendar age estimated from the DAM by the example of CHAR (a, б) the content of pollen of woody vegetation (в), obtained from the core of the Upper Boguty Lake. Legend is given in the caption to fig. 3.

1 – curves reflecting the distribution of individual measured values in accordance with the probability density functions of the calendar age, obtained from the DAM; 2 – integral curve reflecting the total distribution of these values on the calendar time scale; 3 – normalized integral curve reflecting the probability density of the measured values.

возможного возраста 6767 и 7718 кал. л. соответственно). С учетом функции плотности вероятности рассчитываемого по ГВМ возраста такое “точечное” определение будет представлять кривую,

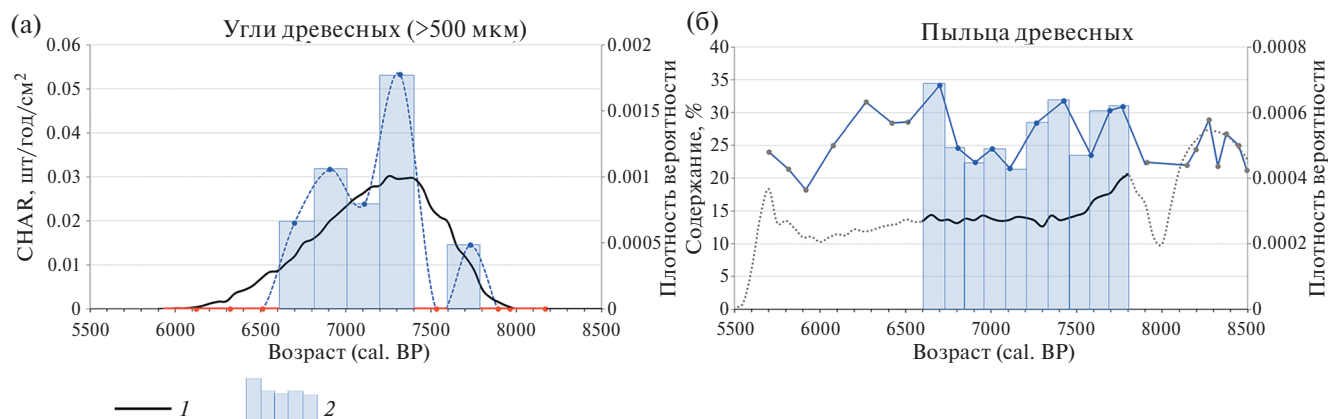


Рис. 5. Сравнение результатов применения традиционного и вероятностного подходов при хронологической интерпретации значений скорости аккумуляции древесных углей крупной фракции (а) и процентного содержания пыльцы древесной растительности (б) в керне донных отложений озера Верхние Богуты. Усл. обозначения см. рис. 3 и 4. 1 – интервал функции плотности вероятности, на котором учтено влияние возрастной интерпретации параметров осадка, измеряемых в соседних интервалах вскрытого разреза; 2 – столбчатая диаграмма, отражающая результаты возрастной интерпретации с использованием традиционного подхода.

Fig. 5. The results of applying the traditional and probabilistic approaches to the chronological interpretation of the CHAR values (a), and the content of pollen of woody vegetation (б), obtained from the core of the Upper Boguty Lake. Legend is given in the caption to figs. 3 and 4.

1 – interval of the probability density function (black dotted line) where the influence of the age interpretation of parameters measured in the adjacent intervals of the section is taken into account; 2 – columnar diagram reflecting the results obtained by the traditional approach.

растянутую на шкале календарного времени более чем на 1 тыс. л. При этом меняется и само значение параметра CHAR – оно характеризуется диапазоном от 0 до ~ 0.005 шт/год/см² на 1 г сухого вещества (рис. 4а).

Аналогичным образом следует учитывать находки микроскопических фрагментов углей во всем интервале глубин, в котором для отобранных образцов функция плотности вероятности принимает ненулевое значение в точке 7319 кал.л. Иными словами, необходимо рассмотреть ненулевые значения измеренной величины CHAR для глубин, где “хвосты” соответствующих функций плотности вероятности перекрывают точку 7319 кал.л. Все такие измерения (вместе с соответствующей функцией плотности вероятности) показаны на рис. 4б. На этой же панели красным цветом показана интегральная кривая всех измерений величины CHAR, а черным пунктиром – функция плотности вероятности. На рис. 4в представлен результат применения “вероятностного” подхода для хронологической привязки результатов палинологического анализа (процентного содержания пыльцы древесных растений).

3.3. Сравнение результатов хронологической привязки различных типов данных с применением обеих методик

Рассмотрим более детально результаты применения каждого из этих подходов к хронологической привязке обоих типов данных (рис. 5).

При анализе величины скорости аккумуляции углей сглаженная кривая, полученная по традиционной методике (синий пунктир на рис. 5а), имеет ярко выраженные экстремумы, включая и нулевое значение около 7000 кал.л. В результате применения “вероятностного” подхода при переносе данных со шкалы глубин на шкалу календарного времени итоговая кривая (черная линия на рис. 5а) имеет гладкую форму с одним максимумом, совпадающим с главным максимумом, определенным по традиционной методике. Таким образом, отражая основной тренд изменения анализируемого параметра (величины CHAR) во времени, предлагаемый подход дает понимание невозможности более детального расчленения полученной зависимости, которая, в первую очередь, определяется точностью построенной ГВМ. Любые палеоэкологические и палеогеографические реконструкции, сделанные с учетом экстремумов меньшего порядка, прослеживаемых в данных по разрезу, будут некорректны, так как будут превышать точность привязки этих данных к шкале календарного времени.

Еще одной особенностью хронологической интерпретации величины CHAR в донных отложениях является неоднозначность трактовки нулевых значений. Эта проблема характерна, прежде всего, при анализе единичных (дискретных) образцов керна с высокой вариабельностью определяемого параметра. Действительно, отсутствие микроско-

пических фрагментов углей может быть связано как с природными (палеоэкологическими) факторами, так и с пропуском/невозможностью их обнаружения в конкретном, небольшом по объему образце. В этом случае исследователь должен принимать решение о том, является ли полученное значение действительно нулем (заверенным, например, результатами других исследований), либо неопределенной величиной. В первом случае можно ставить задачу о хронологической привязке конкретного эпизода (природного события, результатом которого стало обнуление величины CHAR) с пониманием погрешности такой привязки, обеспечиваемой действующей ГВМ. Во втором случае значение величины CHAR для этого временного интервала будет определяться в соответствии с рассчитанной функцией плотности вероятности (черная кривая на рис. 5а).

Как правило, проблема трактовки нулевых значений не стоит при анализе относительно плавно меняющихся характеристик осадка, определяемых в результате непрерывного пробоотбора, например, при проведении палинологического анализа. Результаты применения обоих подходов для хронологической интерпретации изменения процентного содержания пыльцы древесных растений в анализируемом интервале донных отложений представлены на рис. 5б. Отметим, что три максимума находок пыльцы, соответствующих образцам с конкретных глубин и четко выраженных на календарной шкале времени при хронологической привязке традиционным методом, полностью нивелируются при использовании вероятностного подхода. Анализ функции плотности вероятности находок пыльцы (черная кривая на рис. 5б) позволяет говорить лишь об увеличении на ~40% вероятности обнаружить зерна пыльцы древесных растений в интервале 7200–7600 кал. л., который совпадает с меньшим из трех определяемых по стандартной методике максимумов. Таким образом, как и в случае с величиной CHAR, предлагаемый “вероятностный” подход дает понимание невозможности более детальной хронологической реконструкции изменения процентного содержания пыльцы древесных растений, подтверждая наличие на шкале календарного времени лишь одного из локальных экстремумов анализируемого параметра.

Отметим, что возрастная интерпретация кратких природных событий или, например, возрастных границ, установленных в разрезе палинозон, появления/исчезновение в спектре отдельных видов растений, единичных непыльцевых палиноморф и т. д. сводится к хронологической реконструкции дискретных величин. Как и в рассмотренном выше случае, именно точность построенной глубинно-возрастной модели полностью определяет

детальность таких реконструкций и дает исследователю представление о достоверности (границах применимости) интерпретаций, сделанных по стандартной методике.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ключевым моментом палеореконструкций на основании анализируемых характеристик донных отложений озер является привязка выявляемых по разрезу зависимостей к календарной шкале времени, т. е. перенос данных со шкалы глубин на шкалу календарного времени. Такая привязка осуществляется на основании глубинно-возрастных моделей, которые, в свою очередь, строятся по результатам радиоуглеродного анализа отложений. Вероятностный характер определения календарного возраста при калибровке радиоуглеродных дат является неотъемлемой частью любой ГВМ. Неопределенность календарных возрастов, рассчитываемых по ГВМ для каждого сантиметра керна, зависит от многих факторов и, как правило, имеет большую величину. В этой связи хронологическая привязка с точностью до года на основании выгружаемых из ГВМ средних возрастов может приводить к некорректным (с завышенной точностью) реконструкциям.

Предлагаемый “вероятностный” подход позволяет проводить хронологическую привязку измеряемых по керну параметров с учетом неопределенности рассчитываемого по ГВМ календарного возраста. Описанный в данной работе алгоритм реализован в виде скрипта Python в среде RStudio®. Разработанный инструмент дает возможность проводить корректный хронологический анализ различных характеристик донных отложений и обеспечивает достоверность сделанных на их основе палеогеографических реконструкций.

Апробация подхода проведена на донных отложениях озера Верхние Богуты в рамках изучения изменений климата и эволюции ландшафтов высокогорий ЮВ Алтая в постледниковье. Среди прочих характеристик осадка были проанализированы скорость накопления микроскопических фрагментов углей (величина CHAR) и процентное содержание пыльцы древесной растительности, представляющие собой различные типы данных. Показатель CHAR представлен дискретными значениями со значительной вариабельностью (кратные изменения величины) по сравнению с относительно непрерывным и слабо изменяющимся значением палинологической характеристики. Хронологическая привязка обеих характеристик с учетом плотности вероятности рассчитываемого по ГВМ календарного возраста показала, что, несмотря на совпадение возрастных трендов, реконструируемых с ис-

пользованием традиционной и альтернативной методик, не представляется возможным проводить анализ выявляемых во времени зависимостей с той же точностью, с которой эти зависимости прослеживаются по данным на шкале глубин. При этом наличие непрерывной выборки более предпочтительно по сравнению с дискретным набором данных. В любом случае, точность хронологических интерпретаций определяется, прежде всего, качеством построенной ГВМ, а предлагаемый подход позволяет понимать ограничения и детальность проводимых реконструкций.

Анализ построенной на основании 17 УМС ^{14}C радиоуглеродных дат глубинно-возрастной модели осадконакопления озера Верхние Богуты показал, что средняя неопределенность рассчитываемых календарных возрастов составила более 1 тыс. лет. Основными источниками погрешностей при хронологических интерпретациях в таких случаях выступают как значительное “размытие” временных маркеров отдельных событий, так и возможное изменение возрастных трендов при переносе данных со шкалы глубин на шкалу календарного времени с учетом вероятностного определения календарного возраста по ГВМ.

Отдельной сложностью является интерпретация нулевых значений измеряемых по разрезу параметров (таких как содержание непыльцевых палиноморф, углей, микрофауны, растительных остатков и т. п.). При этом наличие нулевых значений при анализе дискретных записей более критично, чем при анализе непрерывных спектров. Нулевые значения могут быть связаны как с природными (палеоэкологическими) факторами, так и с пропуском или невозможностью обнаружения искомым характеристикам в конкретном, очень небольшом по объему, образце. В каждом случае исследователь должен делать соответствующий выбор с привлечением дополнительной информации. Если ноль трактуется исследователем как “значение не определено”, то происходит усреднение искомой величины в данной точке разреза в соответствии с ГВМ. Если же нулевое значение трактуется именно как отсутствие определяемой характеристики, то оно должно интерпретироваться как отдельное событие, и далее должна решаться задача хронологической привязки такого события для данной точки разреза с учетом неопределенности рассчитываемого по ГВМ календарного возраста.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (№ 122041400214-9) и ИНГГ СО РАН (FWZZ-2022-0004, FWZZ-2022-0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бронникова М.А., Агатова А.Р., Лебедева М.П. и др. (2018) Запись голоценовых изменений ландшафтов высокогорий юго-восточного Алтая в почвенно-литологической серии долины р. Богуты. *Почвоведение*. № 12. С. 1413–1430.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X18120031>
- Бутвиловский В.В. (1993) Палеогеография последнего оледенения и голоцена Алтая: событийно-катастрофическая модель. Томск: Изд-во ТГУ. 253 с.
- Agatova A.R., Khazina I.V., Bronnikova M.A. et al. (2018) Reconstruction of postglacial landscape evolution within the eastern periphery of Chuya depression on the basis of multidisciplinary analysis of peats in Boguty river basin, SE Altai, Russia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* Vol. 138. 012001.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/138/1/012001>
- Agatova A., Nepop R., Nazarov A. et al. (2021) Climatically driven Holocene glacier advances in the Russian Altai based on radiocarbon and OSL dating and tree ring analysis. *Climate*. Vol. 9. Iss. 11. 162.
<https://doi.org/10.3390/cli9110162>
- Agatova A.R., Nepop R.K., Shchetnikov A.A. et al. (2024) Sedimentary Records of High-Mountain Lakes in Arid Russian Altai: First Results of Studies (Last Glacial Maximum–Holocene). *Doklady Earth Sci.* Iss. 514. No. 1. P. 140–148
<https://doi.org/10.1134/S1028334X23602626>
- Faegri K., Iversen J., Krzywinski K., Kaland P.E. (1989) Textbook of pollen analysis. Chichester-New York-Toronto-Singapore: John Wiley & sons. 328 p.
- Feurdean A., Veski S., Florescu G., et al. (2017) Broadleaf deciduous forest counterbalanced the direct effect of climate on Holocene fire regime in hemiboreal/boreal region (NE Europe). *Quat. Sci. Rev.* Vol. 169. P. 378–390.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.05.024>
- Kelly R.F., Higuera P.E., Barrett C.M., Hu F.S. (2011) A signal-to-noise index to quantify the potential for peak detection in sediment-charcoal records. *Quat. Res.* Vol. 75. Iss. 1. P. 11–17.
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2010.07.011>
- Mustaphi C.J.C., Pisarcic M.F. (2014) A classification for macroscopic charcoal morphologies found in Holocene lacustrine sediments. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. Vol. 38. Iss. 6. P. 734–754.
<https://doi.org/10.1177/0309133314548886>
- Nepop R.K., Agatova A.R., Uspenskaya O.N. (2020) Climatically driven late Pleistocene–Holocene hydrological system transformation and landscape evolution in the eastern periphery of Chuya basin, SE Altai, Russia. *Quat. Int.* Vol. 538. P. 63–79.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.01.013>
- Whitlock C., Larsen C. (2002) Charcoal as a fire proxy. In: *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Developments in Paleoenvironmental Res.* Vol 3. Springer, Dordrecht. P. 75–97.
https://doi.org/10.1007/0-306-47668-1_5

CHRONOLOGICAL INTERPRETATION OF CHARACTERISTICS OF THE LATE PLEISTOCENE–HOLOCENE LAKE SEDIMENTS BY THE EXAMPLE OF THE UPPER BOGUTY LAKE, SOUTH-EASTERN ALTAI¹

R. K. Nepop^{a, b, #}, A. R. Agatova^{a, b, ##}, A. R. Nepop^{c, ###}, O. B. Kuz'mina^{d, ####}, and S. V. Zhilich^{e, #####}

^a*Sobolev Institute of geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*

^b*Yeltsin Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia*

^c*Yandex Technology, Moscow, Russia*

^d*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

^e*Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS, Novosibirsk, Russia*

[#]*E-mail: agatr@mail.ru*

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

^{###}*E-mail: arnepop@yandex-team.ru*

^{####}*E-mail: kuzminaob@ipgg.sbras.ru*

^{#####}*E-mail: snezhy@yandex.ru*

When studying the late Pleistocene–Holocene lacustrine sedimentary records from lake cores, the chronological interpretation of the analyzed characteristics is made applying a depth-age model (DAM). Usually, DAM is based on the results of radiocarbon dating. As a rule, the measured value is correlated with the average or median value of the calibrated ¹⁴C age of the corresponding centimeter of the core. This approach ensures the transfer of data from the depth scale of the sedimentary section to the calendar time scale “point to point”, i. e., seemingly, without loss of accuracy. However, in reality it ignores the probabilistic nature of determining calendar age and can thus lead to erroneous chronological reconstructions or an overestimation of their accuracy. We propose an alternative approach that takes into account the probability density function of the calendar age calculated applying the DAM and allows to avoid these problems. By the example of the late Pleistocene–Holocene bottom sediments of the Upper Boguty Lake located in the high-mountain Boguty Depression, South-Eastern Altai, the difference in the application of both approaches to the chronological interpretation of the results of anthracological and spore-pollen analyses is demonstrated. The analyzed sediment characteristics – the charcoal accumulation rate (CHAR) and the content of pollen of woody vegetation in pollen-spore spectra – refer to fundamentally different types of data. Two sample sets represent discrete / relatively continuous measured numerical values and the presence/absence of zero values. It is shown that the chronological reconstruction of both types of data should be carried out taking into account the probability density of the calendar age calculated applying the DAM. Another important issue for correct reconstructions is the appropriate interpretation of zero values of measured characteristics, which is especially important in case of discrete sample. Zero values can be either true, reflecting real changes in the natural paleoenvironmental conditions, or be a result of missing or impossible to determine a specific parameter in a small volume of sediment sample. In each case, the researcher must make an appropriate choice using additional information. In general, the accuracy of the chronological interpretation of the analyzed characteristics of lake sediments and the reliability of the further paleogeographic reconstruction are determined primarily by the quality of the DAM. In this context the presented approach allows us to understand the limitations and accuracy of this reconstruction.

Keywords: bottom lacustrine sediments; radiocarbon dating; depth-age model; probability density function; paleogeographic reconstructions

¹ For citation: Nepop R. K., Agatova A. R., Nepop A. R., Kuz'mina O. B., and Zhilich S. V. (2025) Chronological interpretation of characteristics of the Late Pleistocene–Holocene Lake sediments by the example of the Upper Boguty Lake, South-Eastern Altai. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 56. No. 4. P. 701–712 (in Russ). <https://doi.org/10.7868/S2949179725040085>

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the State Assignment of IGM SB RAS (project 122041400214–9) and IPGG SB RAS (projects FWZZ-2022-0004, FWZZ-2022-0005).

REFERENCES

- Agatova A., Nepop R., Nazarov A. et al. (2021) Climatologically driven Holocene glacier advances in the Russian Altai based on radiocarbon and OSL dating and tree ring analysis. *Climate*. Vol. 9. Iss. 11. 162. <https://doi.org/10.3390/cli9110162>
- Agatova A.R., Khazina I.V., Bronnikova M.A. et al. (2018) Reconstruction of postglacial landscape evolution within the eastern periphery of Chuya depression on the basis of multidisciplinary analysis of peats in Boguty river basin, SE Altai, Russia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* Vol. 138. 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/138/1/012001>
- Agatova A.R., Nepop R.K., Shchetnikov A.A. et al. (2024) Sedimentary Records of High-Mountain Lakes in Arid Russian Altai: First Results of Studies (Last Glacial Maximum–Holocene). *Doklady Earth Sci.* Iss. 514. No. 1. P. 140–148. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23602626>.
- Bronnikova M.A., Agatova A.R., Lebedeva M. et al. (2018) Record of Holocene Changes in High-Mountain Landscapes of Southeastern Altai in the Soil–Sedimentary Sequence of the Boguty River Valley. *Eurasian Soil Science*. Vol. 51. No. 12. P. 1381–1396. <https://doi.org/10.1134/S1064229318120037>
- Butvilovsky V.V. (1993) Paleogeografiya poslednego oledeneniya i golotsena Altaya: sobytiino-katastrofiches-kaya model' (Paleogeography of the last glaciation and Holocene of Altai: an event-catastrophic model). Tomsk: TGU (Publ.). 253 p. (in Russ).
- Faegri K., Iversen J., Krzywinski K., Kaland P.E. (1989) Textbook of pollen analysis. Chichester-New York-Toronto-Singapore: John Willey & sons. 328 p.
- Feurdean A., Veski S., Florescu G. et al. (2017) Broadleaf deciduous forest counterbalanced the direct effect of climate on Holocene fire regime in hemiboreal/boreal region (NE Europe). *Quat. Sci. Rev.* Vol. 169. P. 378–390. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.05.024>
- Kelly R.F., Higuera P.E., Barrett C.M., Hu F.S. (2011) A signal-to-noise index to quantify the potential for peak detection in sediment-charcoal records. *Quat. Res.* Vol. 75. Iss. 1. P. 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2010.07.011>
- Mustaphi C.J.C., Pisaric M.F. (2014) A classification for macroscopic charcoal morphologies found in Holocene lacustrine sediments. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. Vol. 38. Iss. 6. P. 734–754. <https://doi.org/10.1177/0309133314548886>
- Nepop R.K., Agatova A.R., Uspenskaya O.N. (2020) Climatologically driven late Pleistocene–Holocene hydrological system transformation and landscape evolution in the eastern periphery of Chuya basin, SE Altai, Russia. *Quat. Int.* Vol. 538. P. 63–79. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.01.013>
- Whitlock C., Larsen C. (2002) Charcoal as a fire proxy. In: *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Developments in Paleoenvironmental Res.* Vol 3. Springer, Dordrecht. P. 75–97. https://doi.org/10.1007/0-306-47668-1_5