

УДК 551.89

## ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВЫСОКОГОРНЫХ ОЗЕР АРИДНОЙ ЗОНЫ РУССКОГО АЛТАЯ (МАКСИМУМ ПОСЛЕДНЕГО ОЛЕДЕНЕНИЯ – ГОЛОЦЕН)

© 2024 г. А. Р. Агатова<sup>1,2,\*</sup>, Р. К. Непоп<sup>1,2</sup>, А. А. Щетников<sup>3,4</sup>, М. А. Крайнов<sup>3,4</sup>,  
Е. В. Иванов<sup>4</sup>, И. А. Филинов<sup>3,4</sup>, П. Динг<sup>5,6</sup>, академик КАН Я. Шу<sup>5,6</sup>

Поступило 07.07.2023 г.

После доработки 27.09.2023 г.

Принято к публикации 03.10.2023 г.

Бурение донных отложений трех озер Богутинской впадины позволило получить осадочные разрезы мощностью до 4.71 м и возрастом до ~24 тыс. лет. Это самая высокогорная (2390–2470 м н.у.м.) и продолжительная осадочная летопись для сопредельных районов Алтая, Тувы и Монголии: она отражает ход природных процессов в наиболее высокой и аридной части Русского Алтая с последнего ледникового максимума до наших дней. Уже на первом этапе исследований для моренно-подпрудного озера Верхние Богуты определен резервуарный эффект – 290 лет для современности и 1.2 и 1.3 тыс. лет для рубежей ~5.7 и ~9.6 тыс. лет соответственно; с использованием комплекса аналитических методов выделена и датирована седиментологическая зона перехода от позднеплейстоценовой ледниково-озерной глины к голоценовому биогенно-терригенному илу – 16–13 тыс. л.н.; установлены масштабы ледников в МИС-2 и позднем дриасе, а также время формирования термокарстовых озер в пределах верхнего конечно-моренного комплекса – не позднее 8.7 тыс. л.н.; подтверждено освоение древесной растительностью ныне безлесной Богутинской впадины в первой трети голоцена.

*Ключевые слова:* озерные осадки, глубинно-возрастные модели, пресноводный резервуарный эффект, аналитические методы, последний ледниковый максимум, голоцен, Русский Алтай

DOI: 10.31857/S2686739724010201

### ВВЕДЕНИЕ

Донные отложения озер являются одним из наиболее полных и детальных архивов изменений природной среды и климата. Комплексный анализ озерных осадков в высокогорных впадинах и ледниковых долинах наиболее высокой (до 3500–4200 м н.у.м.) и аридной юго-восточной части Русского Алтая может дать

информацию о климате этой части Алтайского внутриконтинентального поднятия в конце позднего плейстоцена и голоцене, масштабах оледенения в эпоху последнего ледникового максимума, перестройке гидрографической сети и эволюции растительности в постледниковый период. Реконструкции ландшафтно-климатических изменений, происходящих здесь с конца позднего плейстоцена, актуальны с учетом большого вклада, который вносят ледники этого района в питание верховьев Оби, одной из крупнейших рек планеты, и климатообразующей роли Алтая – орографического барьера на пути внутриконтинентальных влагонесущих атмосферных потоков.

Для комплексного изучения осадочных архивов ЮВ Алтая исследователями ИГМ СО РАН, ИЗК СО РАН и ИГХ СО РАН в июле 2018 г. были пробурены отложения трех озер в Богутинской впадине. В результате удалось получить уникальные летописи ландшафтно-климатических изменений длительностью до 24 тыс. лет – наибольшей не только для всей территории Алтая,

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Уральский Федеральный Университет им. Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup>Институт земной коры Сибирского отделения  
Российской Академии наук, Иркутск, Россия

<sup>4</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского  
отделения Российской Академии наук, Иркутск, Россия

<sup>5</sup>Лаборатория изотопной геохимии, Институт геохимии  
Китайской Академии Наук, Гуанчжоу, Китай

<sup>6</sup>Центр изучения глубинной строения Земли  
Китайской академии наук, Гуанчжоу, Китай

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

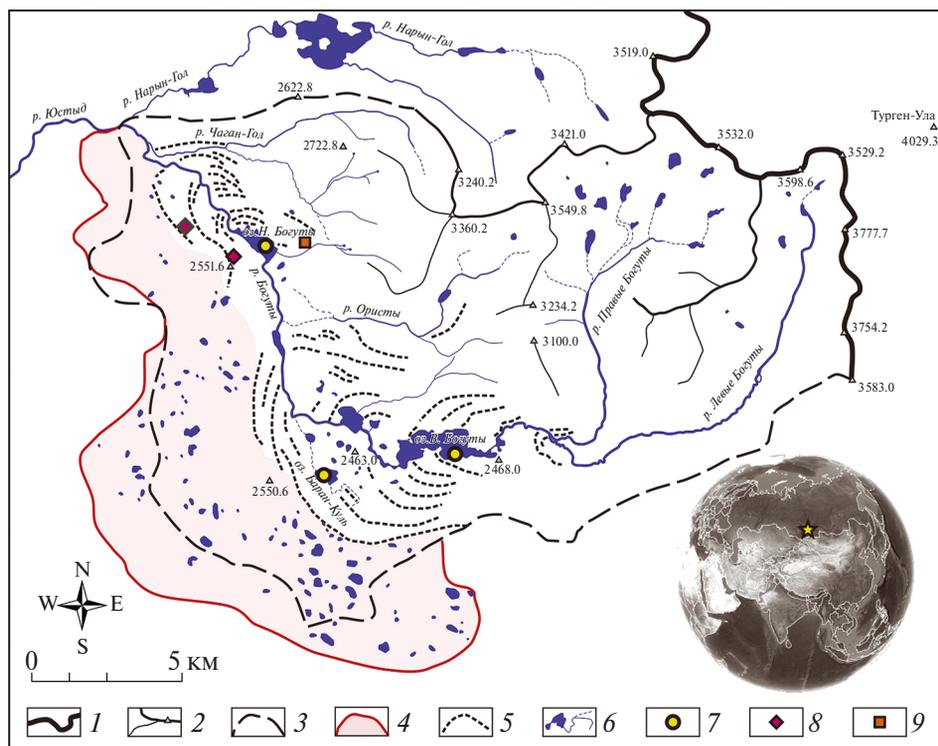
но и для прилегающих районов Тувы и Монголии. Кроме того, опробованные озера – наиболее высокорасположенные из всех изученных до сих пор в этом горном регионе. В данной работе представлены глубинно-возрастные модели осадконакопления, литологическое описание и пилотные результаты аналитических исследований донных отложений. Уже первый этап исследований позволил сделать ряд важных палеогеографических выводов.

### РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ И ЗАДАЧИ БУРЕНИЯ

Малая (25×13 км) высокогорная (2200–2570 м н.у.м.) Богутинская впадина – восточное продолжение крупнейшей на Алтае Чуйской межгорной впадины – полностью перекрыта моренным чехлом с бугристо-западинным рельефом. Вдоль долины р. Богуты протягивается ряд конечно-боковых моренных комплексов

(рис. 1); еще более молодые морены расположены в долинах истоков, Левых и Правых Богутов, и притока Ористы. Последними сформировались морены в карах граничащего с впадиной хребта Чихачева. Современное оледенение верховьев бассейна р. Богуты минимально (<0.2 км<sup>2</sup> в 2011 г. [1]). Исходя из разных палеогляциологических концепций возраст древних морен в Богутинской впадине оценивают весьма по-разному: от среднего плейстоцена до позднего дриаса [2–4]. Разброс от начала МИС-3 до конца МИС-2 <sup>10</sup>Ве-дат валунов на поверхности боковых валов двух нижних моренных комплексов – 50.5–15.6 и 52.5–14.0 тыс. л.н. [5], не позволяет опираться на них в хронологических реконструкциях.

С окончанием последнего ледникового максимума во впадине происходит трансформация гидросети, активное развитие склоновых процессов, почвообразование, климатообусловленная смена растительных сообществ [6–9]. В ходе



**Рис. 1.** Богутинская высокогорная впадина, ЮВ Алтай, и исследуемые озера. 1 – главный гребень хребта Чихачева; 2 – отроги и отметки высот (м н.у.м.); 3 – граница бассейна р. Богуты; 4 – моренный чехол с бугристо-западинным рельефом; 5 – валы конечно-боковых морен; 6 – гидросеть; 7 – исследуемые озера; 8 – места отбора образцов на <sup>10</sup>Ве-датирование [5]; 9 – разрез постледниковых отложений с <sup>14</sup>С-возрастом 14 тыс. лет [6–9].

сокращения ледников в самой впадине и хребте Чихачева возникло большое количество озер разного генезиса [9]. Впадина безлесна, однако  $^{14}\text{C}$ -даты погребенных лесных почв, древесных углей и фрагментов древесной растительности в постледниковых отложениях указывают на ее произрастание здесь уже 14 тыс. л.н. и вплоть до 7.4 тыс. л.н. [6–10].

Геолого-геоморфологические исследования 2011–2018 гг. и 32  $^{14}\text{C}$ -даты постледниковых отложений впадины позволили установить, что морены на высоте 2500 м н.у.м. в районе оз. Нижние Богуты древнее 14 тыс. л.н., то есть допозднедриасовые, а ледники, формировавшиеся в МИС-2, к этому временному рубежу уже значительно отступили; моренно-подпрудные озера возникли ранее 10 тыс.л.н. и намного превышали современные по размерам; обводненность термокарстовых котловин не была постоянной во второй половине голоцена [6, 9]. Тем не менее остаются неизвестными возраст моренного покрова и комплексов конечно-боковых морен во впадине, время возникновения моренно-подпрудных и термокарстовых озер. Какая растительность существовала в высокогорной Богутинской впадине в максимум последнего оледенения, как она развивалась по мере таяния ледников, как менялся климат и состав растительных сообществ в голоцене?

Для решения этих и многих других вопросов было проведено бурение донных отложений трех озер Богутинской впадины: двух крупнейших моренно-подпрудных, Нижних и Верхних

Богутов, сформировавшихся в пределах соответственно нижнего и верхнего комплексов конечно-боковых морен, и наиболее крупного из термокарстовых, названного нами Баран-Кулем, расположенного в пределах верхнего моренного комплекса (рис. 1). Эти озера выбраны как потенциально наиболее долгоживущие и хранящие наиболее полную летопись природных событий и при этом относящиеся к разным лимногляциальным комплексам впадины.

## МЕТОДЫ

Для бурения выбирались удаленные от берегов точки на участках с субгоризонтальной поверхностью дна либо точки с наибольшей глубиной водоема (рис. 2). Осадки озер Нижние Богуты и Баран-Куль отбирались гравитационным керноотборником UWITEC (Австрия). На оз. Верхние Богуты две скважины пробурены керноотборным устройством ударно-канатного типа с использованием поршневого бура на базе плавучей платформы UWITEC. Во второй скважине каждый из лотов закладывали со сдвигом по глубине относительно лотов первой скважины для получения по возможности непрерывной осадочной записи. Из верхней части разреза в обеих точках дополнительно отобрали по одному лоту гравитационным керноотборником.

$AMS^{14}\text{C}$ -датирование донных отложений по общему органическому веществу (ОВ), а также включений наземной растительности для оценки пресноводного резервуарного эффекта

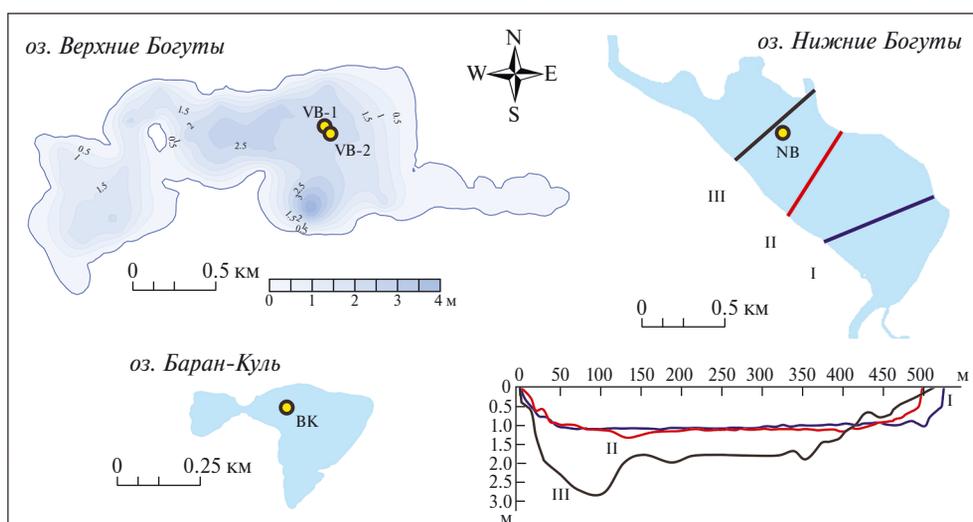


Рис. 2. Исследуемые озера Богутинской впадины и положение точек бурения.

(ПРЭ) проведено в Институте геохимии Китайской Академии Наук (GZ) и ЦКП “УМС НГУ-ННЦ” (GV), химическая подготовка образцов GV – в ИАЭТ СО РАН. Всего получены 32 даты (17 – GZ и 15 – GV): 27 – для оз. Верхние Богуты, 4 – для оз. Баран-Куль, 1 – из основания керн отложений оз. Нижние Богуты. В тексте <sup>14</sup>C-даты приведены калиброванными (2σ) в программе CALIB Rev 8.2 (<http://calib.org>). *Глубинно-возрастные модели* строили в пакете Bacon 2.2 [11].

*Литологическая документация* включала определение структурно-текстурных характеристик отложений и выделение литологических границ. Соотношение компонентов осадка и морфология зерен установлены с помощью микроскопа. В органической части осадка фиксировали наличие, концентрацию, размеры и форму створок диатомовых водорослей.

В кернах VB-1 и VB-2 определяли *влажность осадка*, в отложениях всех трех озер – *магнитную восприимчивость (МВ)*, *содержание ОВ*, *гранулометрический состав* (для образцов из озер Верхние Богуты и Баран-Куль на лазерном анализаторе размера частиц Fritsch Analysette 22 Compact, из оз. Нижние Богуты – Fritsch Analysette 22).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

*Оз. Верхние Богуты* (2468 м н.у.м., 2.13 км<sup>2</sup>, максимальная глубина 4 м) имеет сложную форму с изрезанной береговой линией. В прошлом озеро было крупнее: на склонах котловины сохранился палеоуровень ~2475 м [9].

*Бурение.* Скважины VB-1 (49°42'16.35" с.ш. 89°32'2.46" в.д., глубина 2.5 м) и VB-2 (49°42'17.02" с.ш. 89°32'0.65" в.д., глубина 2.5 м) пробурены на расстоянии 40 м друг от друга (рис. 2), в каждой отобрано три лота (рис. 3). Полную мощность озерного осадка установить не удалось: вследствие значительного увеличения плотности глин в подошве разреза бурение было остановлено. В скв. VB-1 получили осадок с максимальной глубины – 4.71 м, однако в лоте 3 из-за свайного эффекта верхние 56 см осадка не поступили в керноприемник. При бурении скв. VB-2 третьим лотом удалось отобрать осадок полностью до глубины 4.25 м, в том числе в интервале, отвечающем утраченной части разреза скв. VB-1. Выход керн составил 84% для скв. VB-1 и 89% – для VB-2. В целом из 4.71 м разреза отложений оз. Верхние Богуты, вскрытого двумя скважинами, не охарактеризованы керном 15 см (в интервале 3.30–3.45 м), а с учетом

загрязнения осадка в результате обвального шламообразования при бурении – до 36 см. Отбор дополнительных кернов из верхней части разреза позволил получить перекрытие со вторым лотом в скв. VB-1. При увязке керн по глубине учитывались литологические границы и изменения по разрезу аналитических характеристик осадка (рис. 3). Далее по тексту глубины приводятся с учетом увязки.

Для построения *глубинно-возрастных моделей осадконакопления* в оз. Верхние Богуты задействованы 17 <sup>14</sup>C-дат для скв. VB-1 и 7 дат – для VB-2 (рис. 4). Разрез общей мощностью 4.71 м представляет собой осадочную летопись за последние 24 тыс. лет – с максимума последнего оледенения. Тренд постепенного повышения возраста с увеличением глубины в керне позволяет предполагать практически непрерывное осадконакопление за исследуемый период. В обоих кернах средняя рассчитанная скорость осадконакопления оставалась относительно равномерной для всего разреза – 0.20–0.21 мм/год. Согласно моделям, современный ПРЭ в оз. Верхние Богуты составляет ~290 лет. Датирование фрагментов наземной растительности – веточки *Salix* (1.26 м, VB-1) и семени *Larix* (2.34 м, VB-2) – и общего ОВ в осадке на этих же глубинах позволило оценить ПРЭ для рубежей ~5.7 и ~9.6 тыс.л.н.: ~1.2 и 1.3 тыс. лет.

*Литологические характеристики осадка* схожи в обеих скважинах. В разрезе три основные части – биогенно-терригенный ил, ледниково-озерная глина и зона перехода между ними. До глубины 3.14 м в керне VB-1 и 3.09 м в керне VB-2 осадок представлен биогенно-терригенным илом с диатомовой составляющей. Доля ОВ весьма значительна. Диатомеи – крупные пеннатные и циклические формы высокой степени сохранности. Текстуры осадка в кернах VB-1 и VB-2 проявлены с глубин 0.45 и 0.33 м соответственно и представлены неяснослоистой, массивной и слоистой (рис. 3), их последовательность одинакова в обоих кернах. Текстуры обусловлены степенью равномерности и четкости проявления прослоев, обогащенных гидротроилитом и пелитовой составляющей. Доля и размерность створок диатомовых в этих прослоях снижаются. В интервале 3.14–3.30 м в керне VB-1 и 3.09–3.17 м в керне VB-2 биогенно-терригенный ил сменяется алевритистой глиной. В VB-1 присутствует весьма тонкая (<5 мкм) и слабо окатанная минеральная часть, редкие створки диатомовых – мелкого размера. В керне VB-2 неяснослоистая текстура осадка на этом

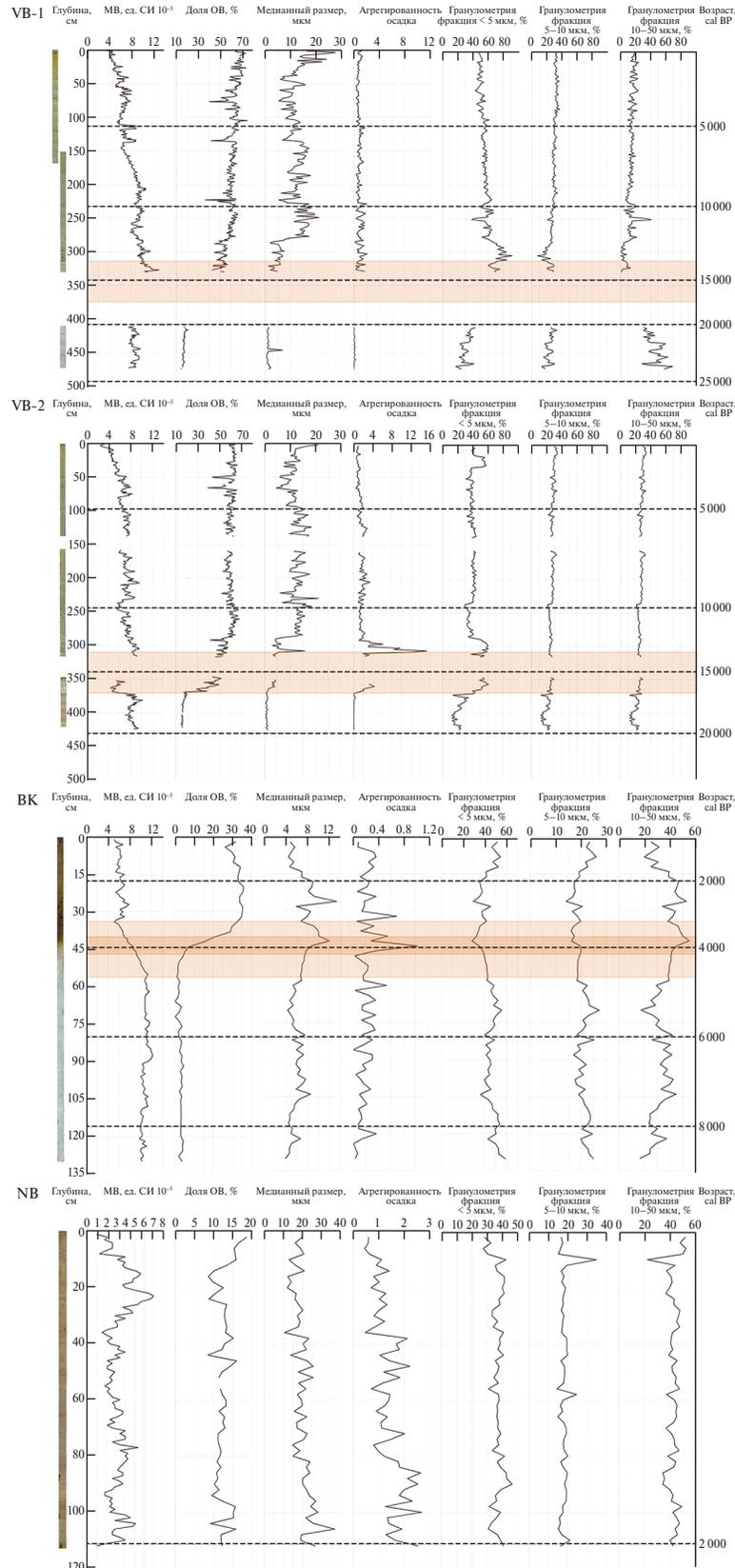


Рис. 3. Характеристики донных отложений озер Верхние Богуты (скв. VB-1 и VB-2), Баран-Куль (BK) и Нижние Богуты (NB), полученные разными методами. Цветом показаны зоны литологического перехода, обсуждаемые в тексте.

участке обусловлена слабым изменением оттенков слоев за счет вариаций концентрации диатомей, доля створок которых значительно снижается к середине интервала. К сожалению, 15 см отложений сводного разреза, включающие нижнюю часть зоны перехода и кровлю нижележащей толщи, отобрать в ходе бурения не удалось. Нижняя часть разреза на интервале 3.45–4.71 м представлена алевритистой глиной, насыщенной более крупным алевритом. В керне VB-1 (4.07–4.71 м) текстура неопределима из-за возникшего при отборе уплотнения. В керне VB-2 неяснослоистая текстура осадка обусловлена неравномерными прослоями, обогащенными алевритом и гидротроилитом. На глубине 3.71–3.74 м слой мелкого и среднего алеврита служит границей между обводненной и уплотненной частью осадка. К этой границе привязаны и резкие скачки значений всех аналитических характеристик осадка (рис. 3). Уплотненная часть осадка в керне VB-2 (3.74–4.25 см) обогащена крупным алевритом разной степени окатанности; здесь фиксируются параболические деформации прослоев – признак начальной стадии действия свайного эффекта.

Значения *MB* в кернах VB-1 и VB-2 меняются в диапазоне  $4-10 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ, что говорит о малом содержании магнитных минералов в осадке. Ее постепенный рост в первых двух лотах обеих скважин может свидетельствовать о гравитационном уплотнении осадка. На интервале 3.71–3.74 м в керне VB-2 (лот 3) *MB* скачкообразно увеличивается, маркируя границу этапов с резко различными условиями осадконакопления.

*Гранулометрический состав* отложений в керне VB-1 слабо меняется вплоть до глубины 2.80 м. В интервале 2.80–3.14 м возрастает содержание пелитовой фракции, но резко падает содержание *ОВ* (с 15 до 5%). На интервале 4.07–4.71 м (лот 3) гранулометрический состав заметно отличается, и в основании скважины содержание крупной фракции и медианный размер зерна достигают максимума. В керне VB-2 отмечены аналогичные изменения за исключением пика (до 15) в степени агрегированности осадка в интервале 2.98–3.10 м.

*Оз. Баран-Куль* (2455 м н.у.м., 0.18 км<sup>2</sup>, максимальная глубина 2.0 м) расположено во внутренней части верхнего конечно-моренного комплекса. Озеро заполняет две самостоятельные соединенные протокой термокарстовые западины и имеет сток в другое термокарстовое озеро, соединяющееся временным водотоком с р. Богуты. В периоды большего увлажнения Баран-Куль принимает притоки из нескольких цепочек небольших термокарстовых озер. На склонах

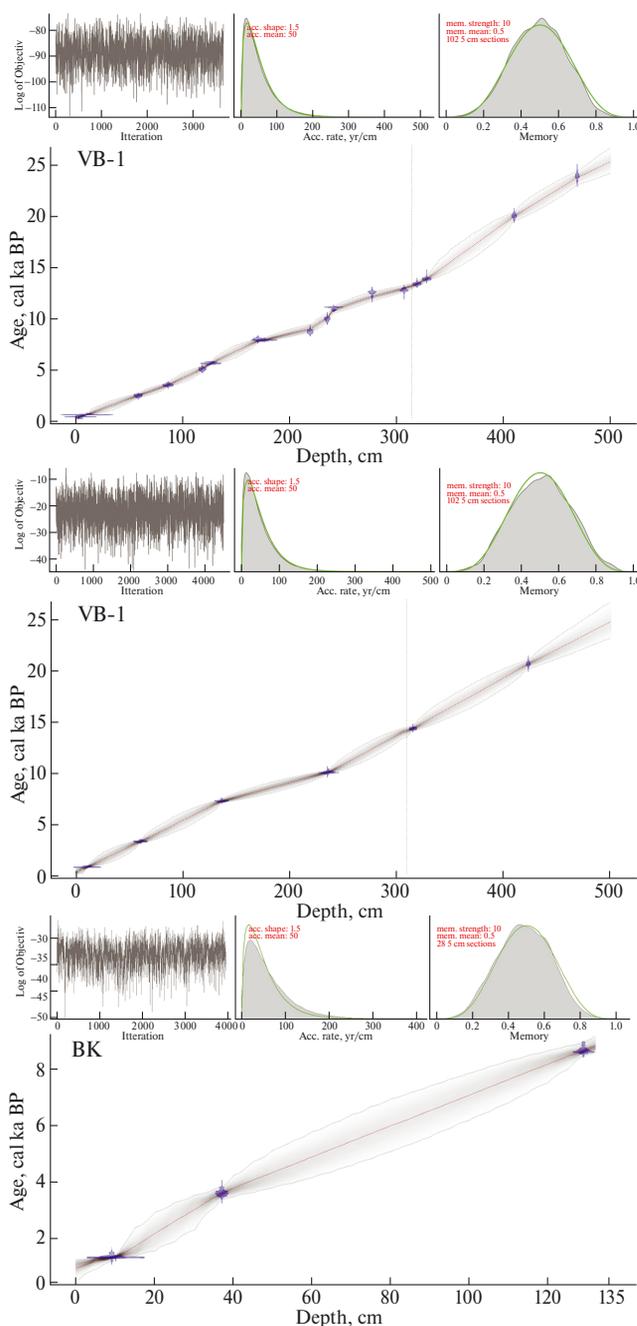


Рис. 4. Глубинно-возрастные модели осадконакопления в озерах Верхние Богуты (скв. VB-1 и VB-2) и Баран-Куль (BK).

котловины сохранился палеоуровень 2460 м. Длина керна BK в точке бурения (49°41'47.68" с.ш. 89°28'37.12" в.д.) – 1.31 м, ниже залегают крупнообломочные моренные отложения.

Предварительная *глубинно-возрастная модель* осадконакопления построена по четырем <sup>14</sup>C-датам (рис. 4), она показывает формирование

осадка со средней скоростью 0.15 мм/год за последние ~8.7 тыс. лет.

*Разрез донных осадков* представлен биогенно-терригенным илом и алевритистой глиной с узкой переходной зоной между ними (рис. 3). 0–0.41 м (0–3.8 тыс. л.) – биогенно-терригенный ил с единичными створками диатомовых водорослей, обогащенный остатками травы и растений. 0.41–0.46 м (~3.8–4.0 тыс. л.) – переходная зона от ила к алевритистой глине, выделяется темно-оливковым оттенком и тонким разрывом (0.41–0.42 м), контролирующим изменение плотности осадка. 0.46–1.31 м (4.0–8.7 тыс. л.) – тонкодисперсная, массивная алевритистая глина, на участке 0.46–0.59 м (4.0–4.9 тыс. л.) обогащенная остатками остракод.

По *содержанию ОВ* и значениям *МВ* в керне ВК также отчетливо выделяются два интервала с плавным переходом между ними, имеющим большую протяженность относительно переходной зоны, выделенной по литологии (рис. 3). Так, до глубины 0.35 м (~3.5 тыс. л.) содержание *ОВ* – около 30–35%, а *МВ* не превышает  $6\text{--}8 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ. В интервале 0.35–0.55 м (~3.5–4.6 тыс. л.) содержание *ОВ* начинает падать, а *МВ* возрастать. С 0.55 м и до основания разреза содержание *ОВ* менее 4%, а *МВ* слабо меняется в диапазоне  $10\text{--}12 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ. Отсутствие значимых изменений гранулометрических характеристик показывает, что рост *МВ* полностью обусловлен прекращением разбавления осадка немагнитной органикой, а не изменением источников сноса.

*Оз. Нижние Богуты* (2387 м н.у.м., 0.70 км<sup>2</sup>, максимальная глубина 2.8 м, средняя – <1.3 м), является реликтом значительно более крупного и глубокого моренно-подпрудного озера с максимальным уровнем ~2400 м н.у.м. [6, 9]. В точке отбора керна (49°45'54.76" с.ш. 89°26'33.33" в.д.) глубина озера составила 1.6 м (рис. 2). Длина керна ВВ – 1.13 м, ниже озерные отложения сменяются перемытой крупнообломочной мореной. <sup>14</sup>С-дата 2069±76 кал. лет GZ10142 из основания разреза показала, что накопление 1.13 м осадка в данной части озерной котловины происходило последние ~2 тыс. лет со средней скоростью 0.55 мм/год.

*Разрез донных осадков* озера представлен органическим илом с остатками пеннатных и реже циклических диатомовых водорослей. По разрезу выделяются: неяснослоистая (0–0.2 м), слоистая (0.2–0.52 м), неяснослоистая (0.52–0.83 м) и тонкослоистая (0.83–1.13 м) текстуры, обусловленные характером переслаивания слоев с разной степенью обогащения гидротроилитом. Доля диатомей сокращается к основанию разреза. Терригенная

часть представлена мелким, средним и реже крупным окатанным и полуокатанным алевритом, доля и размерность которого снижается в интервале 0.83–1.13 м. Видимая органическая часть осадка также сокращается – происходит постепенный переход к алевритистой глине.

*Гранулометрические характеристики* стабильны по всему разрезу и не отражают каких-либо заметных изменений условий осадконакопления. *Магнитная восприимчивость* имеет крайне низкие значения, меняясь по разрезу от 1 до  $7 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ. Максимум ее величина достигает на глубине 0.23 м.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Уникальная по продолжительности осадочная летопись озера Верхние Богуты включает не только весь голоцен, но и поздний дриас и большую часть последнего ледникового максимума (LGM, МИС-2). Высокая обеспеченность глубинно-возрастной модели осадконакопления <sup>14</sup>С-датами (для керна ВВ-1 задействовано 17 дат) позволяет надежно определять возраст фиксируемых в осадках природных событий. Установлено изменение величины пресноводного резервуарного эффекта в этом озере в голоцене: 290 лет для современности и около 1.2 и 1.3 тыс. лет для рубежей ~5.7 и ~9.6 тыс. лет соответственно. Одна из его возможных причин – наличие горизонтов биодетритовых и кластических известняков в морских осадочных породах среднего-верхнего девона, слагающих Богутинскую впадину и хребет Чихачева в пределах бассейна р. Богуты.

Один из значимых результатов первого этапа исследования – установление и датирование зоны перехода от ледниково-озерной алевритистой глины к биогенно-терригенному илу в отложениях оз. Верхние Богуты. Нижняя граница зоны проявлена в керне ВВ-2 на глубине 3.71–3.74 м по всему комплексу аналитических данных. Эти резкие изменения характера осадконакопления произошли около 16–17 тыс.л.н. и вызваны стремительной деградацией последнего плейстоценового оледенения. Верхней границе зоны перехода соответствует <sup>14</sup>С-возраст 13252 ± 275 кал. лет в керне ВВ-1 (3.14 м) и 13295 ± 452 кал. лет – в керне ВВ-2 (3.09 м), то есть поздний дриас. Залегающий выше биогенно-терригенный ил с диатомеями свидетельствует о более благоприятных для развития биоты условиях после окончания краткого позднедриасового похолодания, знаменующего собой завершение последнего ледникового периода Земли. Находка в отложениях оз.

Верхние Богуты семени лиственницы возрастом ~8.3 тыс. лет еще раз подтверждает распространение древесной растительности в ныне безлесной Богутинской впадине [6–10] и сделанное ранее заключение об освоении древесной растительностью территорий ЮВ Алтая и ЮЗ Тувы, расположенных выше современной верхней границы леса, в первой трети голоцена [12–14].

Датирование отложений высокогорного моренно-подпрудного озера Верхние Богуты позволило уточнить возраст ледникового рельефа и амплитуду наступания ледников в последний ледниковый максимум и позднем дриасе в наиболее засушливой части Русского Алтая. Даже неполная часть разреза донного осадка этого озера, вскрытая бурением, формировалась неожиданно длительно — ~24 тыс. лет, при этом модели осадконакопления позволяют предполагать его непрерывность на всем этом временном интервале. То есть уже практически в самом начале последнего ледникового максимума (LGM) в верхней части Богутинской впадины на абсолютных высотах около 2470–2500 м н.у.м. аккумуляция морен, по крайней мере, локально, сменилась озерным осадконакоплением. Следовательно, ледник, оставивший подпрудившие озеро морены, выдвинулся из хребта Чихачева не позднее начала МИС-2, а моренный покров Богутинской впадины — следствие более древнего оледенения. В ходе позднедриасового похолодания ледники в долинах истоков р. Богуты не достигали котловины Верхних Богутов и, значит, не превышали в длину 10–13 км: около 13 тыс. л.н. озерное осадконакопление не прерывалось и не сменялось ледниковым. Таким образом, мнения о позднедриасовом возрасте верхнего комплекса конечных морен, подпрудивших оз. Верхние Богуты [4], и тем более о покровном оледенении Богутинской впадины (и всей высоко- и среднегорной части Русского Алтая) около 14 тыс.л.н. [3] вновь не находят подтверждения. Полученные нами данные указывают на значительно более скромные масштабы оледенения в МИС-2 в аридной части ЮВ Алтая.

Датирование осадков озера Баран-Куль показало, что даже наиболее древние термокарстовые озера появились в пределах верхнего комплекса конечно-боковых морен не ранее первой четверти голоцена, около 8.7 тыс. л.н. Не позднее ~4.6–5.0 тыс. л.н. в этом озере начинается активное развитие биоты, которое стабилизировалось с ~3.5 тыс. л.

Отсутствие отложений древнее 2 тыс. лет в точке бурения в моренно-подпрудном озере Нижние Богуты могло стать следствием изменений гидрологического режима — эпизода обмеления,

произошедшего не позднее 6.2 тыс. л.н. [6, 9], дефляции и эрозии обнажившейся части дна. Анализ отложений озера уточнит реконструкцию ландшафтно-климатических изменений Богутинской впадины, выполненную на основе анализа сопряженного с озером торфяника [6, 9], на отрезке последних 2 тыс. лет.

Дальнейшие комплексные исследования озерных осадков высокогорной Богутинской впадины позволят реконструировать изменения гидрологического режима, климата и растительности в наиболее аридной части Русского Алтая за последние 24 тыс. лет. Это даст возможность провести сравнение с результатами подобных исследований для сопредельных районов Алтая, Тувы и Монголии и уточнить ход природных процессов в центре крупнейшего континента Земли с позднего ледниковья до современности.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФ (<sup>14</sup>C-даты GZ оплачены из средств гранта 22-27-00454, <sup>14</sup>C-даты GV — из средств гранта 22-27-00447). При проведении исследования было задействовано оборудование и инфраструктура ЦКП “Геодинамика и геохронология” ИЗК СО РАН (обновление приборной базы ЦКП осуществлено по гранту 075-15-2021-682).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганюшкин Д. А., Чистяков К. В., Кунаева Е. П. и др. Современное оледенение хребта Чихачева (Юго-Восточный Алтай) и его динамика после максимума малого ледникового периода // Лед и Снег. 2016. Т. 56. № 1. С. 29–42.
2. Девяткин Е. В. Кайнозойские отложения и неотектоника Юго-Восточного Алтая. Москва: Наука, 1965. 243 с.
3. Рудой А. Н. Гигантская рябь течения (история исследований, диагностика и палеогеографическое значение). Томск: ТГПУ, 2005. 224 с.
4. Бородавко П. С. Геоинформационный анализ постгляциального лимногенеза юго-восточного Алтая // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 4. № 2. С. 250–255.
5. Blomdin R., Stroeven A. P., Harbor J. M., et al. Timing and dynamics of glaciation in the Ikh Turgen Mountains, Altai region, High Asia // Quaternary Geochronology. 2018. V. 47. P. 54–71.
6. Agatova A. R., Khazina I. V., Bronnikova M. A., et al. 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 Conference Series // Earth and Environmental Science. 2018. V. 138 (1), P. 012001.
7. Bronnikova M.A., Konopliankova Yu.V., Agatova A.R., et al. Holocene Environmental Change in South-East Altai Evidenced by Soil Record // Geography, Environment, Sustainability. 2018. V. 11 (4). P. 100–111.
  8. Henon P.K., Agatova A.P. Радиоуглеродная хронология голоценовых селей в долине реки Богуты (Русский Алтай) // География и природные ресурсы. 2019. № 1. С. 79–87.
  9. Nepop R.K., Agatova A.R., Uspenskaya O.N. Climatically driven late Pleistocene – Holocene hydrological system transformation and landscape evolution in the eastern periphery of Chuya basin, SE Altai, Russia // Quaternary International. 2020. V. 538. P. 63–79.
  10. Бутвиловский В. В. Палеогеография последнего оледенения и голоцена Алтая: событийно-катастрофическая модель. Томск: Изд-во ТГУ, 1993. 253 с.
  11. Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process // Bayesian Anal. 2011. V. 6. № 3. P. 457–474.
  12. Назаров А. Н., Соломина О. Н., Мыглан В. С. Динамика верхней границы леса и ледников центрального и восточного Алтая в голоцене // ДАН. 2012. Т. 444. № 6. С. 671–675.
  13. Ganyushkin D., Chistyakov K., Volkov I., et al. Palaeoclimate, glacier and treeline reconstruction based on geomorphic evidences in the Mongun-Taiga massif (south-eastern Russian Altai) during the Late Pleistocene and Holocene // Quaternary International. 2018. V. 470. P. 26–37.
  14. Agatova A., Nepop R., Nazarov A., et al. Climatically driven Holocene glacier advances in the Russian Altai based on radiocarbon and OSL dating and tree ring analysis // Climate. 2021. V. 9. № 11. P. 162.

## SEDIMENTARY RECORDS OF HIGH-MOUNTAIN LAKES IN THE ARID RUSSIAN ALTAI – FIRST RESULTS OF MULTIDISCIPLINARY STUDY (LAST GLACIAL MAXIMUM – HOLOCENE)

A. R. Agatova<sup>a, b, #</sup>, R. K. Nepop<sup>a, b</sup>, A. A. Schetnikov<sup>c, d</sup>, M. A. Krainov<sup>c, d</sup>,  
E. V. Ivanov<sup>d</sup>, I. A. Filinov<sup>c, d</sup>, P. Ding<sup>e, f</sup>, Academician of the CAS Xu Yi-G<sup>e, f</sup>

<sup>a</sup>Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russian Federation

<sup>b</sup>Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

<sup>c</sup>Institute of Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

<sup>d</sup>A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation

<sup>e</sup>State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry,  
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China

<sup>f</sup>Center for Excellence in Deep Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640, China

<sup>#</sup>E-mail: agat@igm.nsc.ru

Sediment cores from three lakes in the Boguty depression allowed studying sedimentary records up to ~24 ka old in subaquatic sections up to 4.71 m long. This is the highest (2390–2470 m a.s.l.) and longest achieve of geochronological and paleoecological data for the neighboring areas of Altai, Tuva and Mongolia, which reflects the course of natural processes in the highest and most arid part of the Russian Altai from the Last Glacial Maximum till the present day. Paper reports estimations of the freshwater reservoir effect for the moraine-dammed Upper Boguty lake, which are 290 years for the present time, and about 1200 and 1300 years for the times ~5.7 and ~9.6 ka ago, respectively; chronological benchmarks (16–13 ka ago) for sedimentological transition zone between the late Pleistocene glacial-lacustrine clays and the Holocene biogenic-terrigenous silts, which was determined on the basis of multidisciplinary analysis; the size of glaciers in MIS-2 and in the Younger Dryas, as well as the time of thermokarst lakes formation (no later than 8.7 ka ago) within the upper terminal moraine complex; conformation of wide spreading of tree vegetation in the now treeless Boguty depression in the first third of the Holocene.

**Keywords:** lacustrine sediments, depth-age model, freshwater reservoir effect, analytical methods, Last Glacial Maximum, Holocene, Russian Altai