

ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РОССИИ: ОТ КАЛИНИНГРАДА ДО КАМЧАТКИ

УДК 551.4.03:556.55(470.317)

СТРОЕНИЕ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ДОННОГО РЕЛЬЕФА ЧУХЛОМСКОГО ОЗЕРА (КОСТРОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)[#]

© 2023 г. К. Г. Филиппова^{1,*}, Е. А. Константинов¹, А. Л. Захаров¹, Н. В. Кузьменкова^{1,2},
А. А. Медведев¹, М. Г. Мельников³

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия

³ВШЭ, факультет географии и геоинформационных технологий, Москва, Россия

*E-mail: xenia.filippova@igras.ru

Поступила в редакцию 15.08.2023 г.

После доработки 02.09.2023 г.

Принята к публикации 08.09.2023 г.

Представлены результаты исследования донного рельефа и строения донных отложений Чухломского озера (Костромская область, Чухломский район). Результаты собственной батиметрической съемки позволили существенно детализировать имеющиеся представления о топографии озерного дна. Участки повышенных глубин имеют вид двух ложбин, расходящихся от центра озера в сторону г. Чухлома. Максимальная глубина внутри ложбин (и для всего озера) достигает 5.4 м, средняя глубина озера составляет 2.2 м. В рельефе дна выражены две ступени – 2.0–2.4 м и 1.5–1.8 м.

Строение донных отложений Чухломского озера вскрыто бурением со льда двумя скважинами: Chu7A – на участке фоновых глубин (длина керна 9.45 м); и Chu13A – внутри ложбины (длина керна 7.45 м). Для керна Chu13A получено 5 радиоуглеродных AMS дат. Осадочные последовательности доголоценовой части обоих кернов обнаруживают высокое сходство по строению и абсолютным высотам маркирующих горизонтов, выделенных по комплексу литологических анализов. Строение и мощность голоценового осадка существенно различается. На участке фоновых глубин мощность органоминерального ила голоценового возраста составляет 3.8 м, а внутри ложбины мощность этого слоя составляет всего 1.45 м. Причем в строении голоценового осадка внутри ложбины наблюдаются перерывы в осадконакоплении, возраст которых на основании модели осадконакопления оценивается как 10.6–5.3 и 4.9–0.06 кал. тыс. л. н. Вероятным механизмом происхождения ложбин является локализованная эрозия, вызванная ветровыми течениями в условиях крайне мелководного озера. Дополнительным фактором эрозии может выступать дегазация донных отложений, приводящая к разрыхлению придонного слоя осадков, что делает их податливыми для размыва. Прекращение размыва осадка внутри ложбины совпадает по времени с сооружением плотины на реке Вёкса и подъемом уровня озера на 1.0–1.5 м в 1960-х гг.

Ключевые слова: рельеф озерного дна, озерные отложения, литологические исследования, радиоуглеродный анализ, палеолимнология, генезис донного рельефа

DOI: 10.31857/S2949178923040047, **EDN:** HRXGEY

ВВЕДЕНИЕ

Чухломское озеро расположено в северной части Костромской области (Чухломский район) на Галичско-Чухломской возвышенности (водораздел рек Костромы и Унжи) (рис. 1, (а, б)). Оно является одним из крупнейших и наиболее древних озер центра Восточно-Европейской равнины наряду с такими озерами, как Плещеево, Неро и Га-

личское. Расположение озера к югу от границы последнего валдайского оледенения (Геологическая карта..., 1972), дает основание предполагать, что озеро образовалось после отступления московского ледникового покрова – т.е. его возраст может достигать 130–150 тыс. л.

Первые научные сообщения, касающиеся донного рельефа и отложений озера, относятся к началу XX столетия. В работе А. Грачева 1902 г. описывается неоднородность рельефа дна Чухломского озера: “Дно озера на несколько метров покрыто тонким илом, наибольшая глубина современного дна – 4.5 м; средняя глубина – около 1.5 м. Как и в Галичском озере, глубокие места

[#] Ссылка для цитирования: Филиппова К.Г., Константинов Е.А., Захаров А.Л. и др. (2023). Строение и происхождение донного рельефа Чухломского озера (Костромская область) // Геоморфология и палеогеография. 2023. Т. 54. № 4. С. 145–162. <https://doi.org/10.31857/S2949178923040047>; <https://elibrary.ru/HRXGEY>

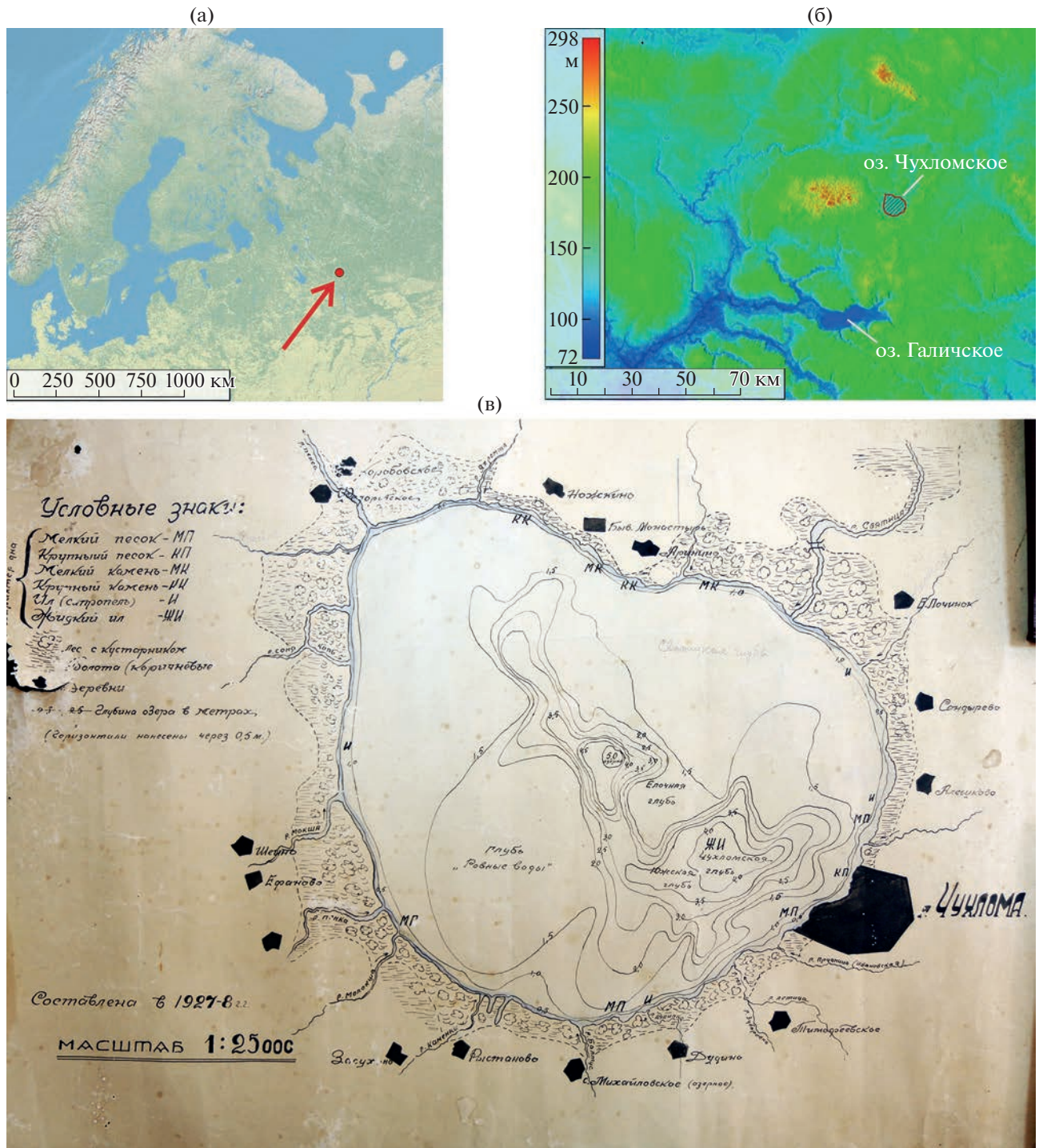


Рис. 1. Чухломское озеро.

(а) – обзорная топографическая карта Европейского Севера; (б) – цифровая модель рельефа SRTM; (в) – архивная батиметрическая карта, составленная Г.Г. Чалеевым в 1927–1928 гг., фотокопия. Находится в Чухломском краеведческом музее.

Fig. 1. Chukhlomskoe Lake.

(а) – overview topographic map of the European North; (б) – digital elevation model SRTM; (в) – archival bathymetric map compiled by G.G. Chaleev in 1927–1928, photocopy. Located in the Chukhloma Museum of Local Lore.

(2.5–4.5 м) здесь расположены полосами, хотя встречаются и овальные углубления. Таково, например, Святицкое озерко (2–2.5 м глубины) в

северо-восточной части, напротив Городецкого монастыря, в $\frac{3}{4}$ версты от берега. Преобладающее направление глубей – с востока на запад; ширина

от 100–160 метров” (Грачев, 1902, с. 13). Исторически углубления донного рельефа имеют местные названия – глуби Чухломская, Дудинская, Ефановская, Святицкая, Святицкое озерко, Южная, Елочная, глубь Ровные воды и др. “Несколько углубленная полоса, примерно на 0.5–0.75 метра, тянется во многих местах близ берега, параллельно ему, а также отходят небольшие заструги от впадающих речек. Такова, например, Михайловская застрада, против речки Каменки, в 40 метров ширины, 2 метра глубины и около 400 м длины. Все остальное дно озера лежит между 1.25–1.75 метра глубины и покрыто густыми зарослями водорослей; кое-где виднеются разбросанные по озеру островки” (Грачев, 1902, с. 14). Подробной карты, соответствующей этому описанию, не обнаружено.

В Чухломском краеведческом музее находится батиметрическая карта озера, составленная в 1927–28 гг. Г.Г. Чалеевым (рис. 1, (в)), которая местами значительно отличается от описания А. Грачева (Грачев, 1902). На карте Чалеева “озерко”, расположенное в центральной части озера, имеет глубину 5.0 м.

Озеро активно изучалось в 20–30-е гг. XX в. с целью разведки запасов сапропелевых отложений, но фактический материал опубликован лишь в небольших описательных статьях (Чернов, 1930; Штурм, 1932). Изыскания по оценке запасов сапропеля снова проводились в 1959 и 1992–1993 гг. (Стахневич, 1959; Гурин, 1993). Изучалось строение верхней части донных отложений, площадное распространение сапропеля, описаны типы сапропеля и изучен его химический состав.

Во второй половине XX в. научные работы, в основном, были посвящены рыбохозяйственным задачам, изучались гидрохимический режим и экологические характеристики водоема (Баранов и др., 1981; Чередниченко, 1987; Сиротина, Воронцова, 2016; Тимофеева, Юхно, 2019).

Анализ литературы показал, что донные отложения озера практически не изучены в палеогеографическом отношении. В опубликованных работах не обнаружено значимых палеогеографических реконструкций, отсутствуют датировки сапропелевых отложений, не обнаружено количественных данных о литологическом составе отложений, не проводились палеонтологические исследования. Опубликованные данные о донном рельефе весьма противоречивые, а существующая батиметрическая карта имеет низкую детальность.

Автономное положение Чухломского озера в пределах возвышенности, небольшая площадь водосбора, отсутствие крупных притоков создают предпосылки для медленного, стабильного и непрерывного осадконакопления, что позволяет

рассматривать его отложения как перспективный седиментационный палеоархив верхнего плейстоцена и голоцена регионального значения.

Настоящее исследование нацелено на получение первых достоверных данных о батиметрии и генезисе донного рельефа, а также о строении, составе и возрасте верхней части донных отложений Чухломского озера.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований (рис. 1, (а, б)) расположен в пределах высокого Костромского Заволжья и представляет собой возвышенную холмистую равнину, сформировавшуюся в результате ледниковой аккумуляции и последующей эрозии (Кордун и др., 1965).

Чухломское озеро расположено в пределах Галичско-Чухломской возвышенности, которая имеет максимальные для Костромской области высоты – от 150.0 до 293.3 м. У озера небольшой водосбор и компактный размер – площадь водосбора по данным Государственного водного кадастра (1986) составляет 269 км², площадь водной поверхности – 49.15 км² при максимальной длине озера с СЗ на ЮВ 8.8 км и максимальной ширине с ЮЗ на СВ 7.6 км. Чухломское озеро является вторым по площади (после Галичского) на территории Костромской области. Абсолютная высота уреза – 148.9 м. В озеро впадают небольшие реки – Святица, Сандоба, Соня, Ивановская и др., вытекает река Вёкса Чухломская. Озеро относится к средне- и слабопроточным по скорости внешнего водообмена, в нем преобладают автохтонные процессы. Сток твердого, биогенного и загрязняющих веществ затруднен. Озеро является высокопродуктивным. Берега озера заболачиваются в настоящее время, площадь водной поверхности сокращается, ухудшаются условия обитания промысловых видов рыб (в осеннее и зимнее время часты заморы), происходит процесс активной эвтрофикации водоема (Тимофеева, Юхно, 2019).

В 1963 г. на р. Вёксе, вытекающей из озера, была построена шандорная переливная плотина (высота верхнего бьефа 150.0 м, нижнего – 148.4 м) (Румянцев и др., 2015), отремонтированная в 2010-х гг. (со слов местных жителей). Плотина подняла уровень озера примерно на 1.0–1.5 м. Это нужно учитывать при сравнении описаний и карт первой половины XX в. с современными.

Особенность водного режима Чухломского озера определяется не только наличием плотины, но и распространением вокруг озера заболоченных территорий (около 17% площади водосбора занято одним только болотным массивом – ООПТ “Святое болото”) (Тимофеева, Юхно, 2019).

Климат района умеренно-континентальный, с коротким теплым летом и продолжительной холодной и многоснежной зимой. По данным для середины XX в. озеро замерзает, в среднем, к 30 октября, а очищается ото льда к 5 мая. В зимний сезон 2014–2015 гг. ледостав установился 16 октября, а вскрытие ото льда произошло 22 апреля (Сиротина, Воронцова, 2016). В период весеннего половодья уровень воды в озере поднимается над меженным в среднем на 0.32 м, максимальные значения — 0.66 м. Средняя годовая температура воздуха в г. Чухломе достигает 2.1 °C, среднее годовое количество осадков — 589 мм (Кордун и др., 1965). Положение района в зоне избыточного увлажнения создает благоприятные условия для прогрессирующего заболачивания низинных участков, а высокие летние температуры способствуют интенсивному торфообразованию. В районе преобладают ветры Ю, ЮЗ и ЮВ румбов (Научно-прикладной ..., 1992). А. Чернов (1930) отмечает, что по летнему термическому режиму Чухломское озеро имеет черты мелководных водоемов прудового типа, а состояние равенства температур по глубине достигается по причине перемешивания из-за частых ветров. Средние скорости ветра вблизи озера — 2.4–3.4 м/с, минимальные наблюдаются в июле-сентябре, максимальные — в октябре-июне (Кордун и др., 1965). При этом случаются и шторма, когда от берегов отрываются крупные куски сплавин, которые перемещаются по озеру в виде плавучих островов.

Залесенность района составляет 70–80% (Кордун и др., 1965), что вместе с низкой расчлененностью рельефа затрудняет эрозию внутри водосборного бассейна озера.

В 1936 г. профессором К.К. Марковым были обследованы расположенные вблизи г. Чухломы Ивановский и Семеновский овраги, в которых описаны погребенные торфяники и озерные глины, залегающие на валунных суглинках (Марков, 1940). Отложения были отнесены к миккулинским межледниковым образованиям (Жузе, 1939). Ледниковых отложений валдайского возраста в пределах рассматриваемого района не описано. Котловина Чухломского озера вложена в ледниково-аккумулятивные отложения довалдайских оледенений и межледниковий. Водоносный горизонт ниже- и среднечетвертичных аллювиальных и флювиогляциальных отложений подстилается водоупорными верхнеюрскими глинами (Гидрогеологическая карта..., 1973).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сбор полевых материалов. На первом этапе полевых работ в феврале 2021 г. в районе Чухломской губы были выполнены рекогносцировочные промеры глубины со льда с помощью лота для верификации архивной карты и выбора пер-

спективных участков для бурения донных отложений. Оказалось, что распределение глубин на имеющейся карте Г.Г. Чалеева 1927–1928 гг. не полностью совпадает с реальной батиметрией водоема. Поэтому потребовалось проведение собственной детальной батиметрической съемки всей акватории озера, которая была осуществлена в июле 2021 г.

Рекогносцировочное обследование донных отложений со льда было проведено ручным буром Eijkelkamp (13 точек). По результатам обследования были выбраны места для бурения опорных колонок при помощи поршневого бура Ливингстона (Wright, 1967). В нашей модификации бур имеет пробоотборник длиной 1 м, его диаметр составляет 50 мм. Бурение проводилось в стык, без перекрытия. Получены 2 колонки отложений на морфологически различных участках озерного дна. Колонка Chu13A в глубоководной части (ложбине) имеет длину 7.45 м, а колонка Chu7A на поверхности фоновых глубин — 9.45 м. Для участка Chu13A дополнительно выполнен отбор верхней слабоконсолидированной части осадка по методике Е.А. Константинова при помощи подъема и заморозки придонного слоя (Konstantinov, 2019).

Батиметрическая съемка и ДЗЗ. Во время летней экспедиции в 2021 г. выполнены работы по эхолотированию озерного дна. В качестве оборудования использовались двулучевой эхолот Deeper Pro+ и многолучевой эхолот Lowrance HDS-9 Live, совмещенный с локатором бокового обзора. Съемка велась с двух разных лодок и двумя разными способами крепления приборов: эхолот Deeper Pro+ буксировался за лодкой, а эхолот Lowrance HDS-9 Live жестко крепился к дну лодки. Разница в глубине погружения эхолота учитывалась на этапе постобработки материалов съемки. В итоге проведено полное эхолотирование озера, а общая длина маршрутов съемки превысила 80 км.

Для первичной работы с данными эхолотирования использовался программный пакет Reef-Master, который позволил интегрировать данные обоих эхолотов, просматривать и корректировать данные съемки, анализировать данные с локатора бокового обзора. Затем все данные с обоих эхолотов были экспортированы в программу Surfer, где производилась интерполяция данных различными методами и строились цифровые модели дна водоема. Окончательное оформление карт осуществлялось в программе Global Mapper21, в которой производились трехмерная визуализация и подбор светотеневой пластики при отображении для более выразительного оформления рельефа дна.

Картографирование участков донных эманацій (выхода газа и/или разгрузки подземных вод) проведено на основе материалов сканирования

дна при помощи гидролокатора бокового обзора, установленного на эхолоте Lowrance HDS-9 Live, который позволяет с высокой точностью определять детали рельефа дна водоема и плотность донных отложений. Также эта задача решалась на основе анализа космических снимков. Обработка дистанционной информации была нацелена на выявление косвенных дешифровочных признаков — обнаружение полыней. Источником дистанционной информации послужили временные серии снимков со спутников PlanetScope за период 2017–2022 гг. В основном использовались снимки за зимний период с ноября по апрель, когда озеро было полностью покрыто льдом. Наиболее информативными оказались снимки, которые захватывают период установления и разрушения ледового покрова, так как именно в это время достаточно достоверно можно идентифицировать полыни. Кольцевые структуры на поверхности льда часто служили дополнительным индикатором. Яркие характеристики льда на космических снимках изменяются по мере приближения к центру полыни. Еще одним устойчивым признаком для дешифрирования таких мест являются трещины в ледяном покрове водоема в период ледостава.

Участки донных эманаций детектировались и при анализе эхограмм. На профиле эхограммы, прежде всего, распознается смена типа донного грунта. В придонном слое воды на таких участках присутствует органоминеральная взвесь, наличие которой выражается в плавном затухании отраженного сигнала на эхограмме. Крупные выходы на эхограмме представлены углублениями в донном грунте. Другой характерной чертой для детектирования по эхограмме являются температурные аномалии приповерхностного слоя воды. Это происходит в результате подъема придонных вод к поверхности. В летний сезон такие участки характеризуются низкотемпературными аномалиями у поверхности. В зимний сезон, наоборот, — высокотемпературными аномалиями.

Исследование радионуклидов. Исследование верхней части осадка позволяет оценить современные темпы осадконакопления путем изучения распределения по глубине радиоизотопов ^{137}Cs и неравновесного ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$). Для естественных радиоактивных маркеров, таких как ^{210}Pb , лимит оценки возраста донных осадков с их использованием равен десяти периодам полураспада. В случае с неравновесным свинцом, период полураспада которого составляет 22 года, лимит оценки равен 220 годам (с высокой степенью достоверности — до 180 лет). Техногенный ^{137}Cs попал в окружающую среду в результате глобальных испытаний ядерного оружия и ядерных катастроф, поэтому периоды его выпадений известны. Техногенный ^{137}Cs выпадал из атмосферы в

период с 1954 до 1980 г. с максимумами в 1958 и 1963 г. На Европейской территории СССР ^{137}Cs чернобыльского происхождения выпадал, в основном, в период с 26 апреля по 15 мая 1986 г. (Corbett, Walsh, 2015).

Исследование короткоживущих радионуклидов было выполнено для верхней части осадка на участке внутри ложбины — Чу13А. Замороженный керн длиной 0.6 м был распилен на образцы с шагом 2–4 см. Образцы были просушены при температуре 105 °С, перетерты и упакованы в пластиковые контейнеры для последующего гамма-спектрометрического анализа. Массы образцов составили от 1 до 6 г. Определение содержания гамма-активных радионуклидов осуществлялось при помощи гамма-спектрометра ORTEC GEM-C5060P4-B с применением полупроводникового детектора из сверхчистого германия (HPGe) с бериллиевым окном и относительной эффективностью 20%. Время экспозиции проб от 60000 до 250000 с в зависимости от наблюдаемой интенсивности регистрации искомых радионуклидов. Анализ выполнен на кафедре радиохимии Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Исследования литологического состава отложений. Комплексный литологический анализ образцов из колонок Чу7А и Чу13А выполнен с шагом 5 см в лаборатории палеоархивов природной среды Института географии РАН.

Гранулометрический анализ отложений проведен на лазерном дифрактометре Malvern Mastersizer 3000 с приемником-диспергатором Hydro EV. Пробоподготовка образцов включала удаление карбонатной составляющей осадка при помощи обработки 10% раствором соляной кислоты HCl и удаление органического вещества при помощи 30% раствора пероксида водорода H_2O_2 . После отмывки от реактивов в образцы добавлялся 4% раствор пиррофосфата натрия $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ для стабилизации суспензии. Затем образцы направлялись в анализатор для измерения. Пипеткой образец переносился из пробирки в кювету блока приемника-диспергатора, где материал интенсивно перемешивался и обрабатывался ультразвуком в течение 100 с перед измерением. Каждый образец был измерен 9 раз при одной загрузке, результат усреднен в программном обеспечении анализатора Mastersizer v.3.62. Расчет распределения частиц по размерным фракциям произведен на основе дифракционной модели Ми (Ozer et al., 2010).

Потери при прокаливании (ППП) определены согласно методике Heiri et al. (2001). На первом этапе образцы объемом 5–10 мл, помещенные в фарфоровые тигли, высушивались при температуре 105 °С на протяжении 12 ч. Далее производилось последовательное прокалывание при температуре 550 °С (4 ч) и 950 °С (2 ч). Потери в весе

определялись после каждого этапа путем взвешивания на электронных весах. Результирующие значения вычислялись следующим образом: $ППП\ 550 = ((DW105 - DW550)/DW105) \times 100$; $ППП\ \Delta 950 = ((DW550 - DW950)/DW105) \times 100$, где DW – сухой вес. Согласно (Bengtsson, Enel, 1986; Heiri et al., 2001) ППП 550°C позволяют оценить содержание органического вещества в осадке, а разница ППП 950°C и ППП 550°C характеризует потери CO₂ карбонатов. Оценка содержания карбоната кальция (CaCO₃) выполнялась по методике (Dean, 1974) путем деления ППП $\Delta 950$ на 0.44.

Измерение удельной (массовой) магнитной восприимчивости (МВ) выполнялось на каппаметре ZH Instruments 150L. Методика измерения опирается на рекомендации, описанные в работе Maher et al. (1998). Образцы объемом 8–12 мл предварительно высушивались до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу на протяжении 24 ч при 40°C. Далее определялась масса образцов путем взвешивания на электронных весах с точностью 0.01 г. Затем образцы, помещенные в пластиковые бюксы, погружались в измерительную ювету каппаметра. Для каждого образца выполнялось по 4 измерения. Итоговый результат вычислялся нахождением среднего значения.

Определение возраста отложений. Методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS) определен радиоуглеродный возраст шести образцов органоминерального и минерального ила по валовому органическому углероду для колонки Chu13A. Пробоподготовка образцов произведена в ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” Института географии РАН, измерение – в Центре изотопных исследований Университета Джорджии (США). Калибровка радиоуглеродных дат выполнена с помощью алгоритма OxCal20 (Reimer et al., 2020).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Донный рельеф. Составленная модель глубин (рис. 2) существенно уточнила представления о морфологии озерной ванны. Результаты съемки показали, что участки повышенных глубин имеют вид двух замкнутых ложбин, расходящихся от центра озера в сторону г. Чухломы. Ложбины расходятся под углом 40° и через 1 км от точки разделения простираются почти параллельно по азимуту 130°. Ширина единой ложбины (до разделения) в центральной части озера составляет 900 м. Ширина западной ложбины составляет 550–750 м. Ширина восточной ложбины составляет 450–600 м. Протяженность ложбин составляет 4.8 и 5.2 км соответственно. Концы ложбин загибаются вблизи г. Чухлома в противоположных направлениях и протягиваются вдоль берега на 1.2 и 2.0 км. Северо-западное окончание ложбинного комплекса резко обрывает-

ся, в рельефе дна нет признаков продолжения ложбины в направлении истока Вёксы.

Площадь озера по нашим данным составляет 49.15 км² (включая залив до плотины), объем воды – 0.1084 км³. Максимальная глубина в ложбинах (и для всего озера) достигает 5.4 м. Среднее значение глубины озера, определенное по совокупности точек промеров, составляет 2.4 м. Медианное значение – 2.26 м, модальное – 2.24 м. Средняя глубина озера, определенная гидрологическим методом (S/V), составляет 2.2 м. По гистограмме частоты встречаемости глубин (рис. 3) в рельефе озерного дна выделяются две ступени: глубины 1.6–1.7 м занимают 9.2% площади дна, а глубины 1.9–2.5 м – 63.3%. На глубины более 2.5 м приходится 20.5% площади дна, а на глубины менее 1.6 м всего 4.5%.

Состав и строение донных отложений. В строении кернов Chu13A и Chu7A наблюдаются как черты сходства, так и различия (рис. 4). Нижние части обеих колонок характеризуются схожим строением. В основании залегает неслоистый однородный серый минеральный ил (содержание органического вещества менее 5%). В кровле минерального ила наблюдается повышенное содержание песчаной фракции в обеих колонках. Выше содержание органического вещества плавно возрастает и в маломощном слое темно-серого органоминерального ила достигает 10.0–15.0%. Его перекрывает слой светло-серого карбонатного ила (содержание CaCO₃ 43.0–51.0%) мощностью 0.18–0.20 м. Карбонатный ил перекрыт органоминеральным илом (содержание органического вещества более 40%) буро-оливкового цвета. Мощность этого слоя в колонках разная: 0.85 м в колонке Chu13A и 3.2 м в колонке Chu7A. Самая верхняя часть осадка представлена органическим слабоконсолидированным буро-оливковым илом мощностью до 0.6 м. Подробное строение колонок приведено в табл. 1 и 2.

В гранулометрическом отношении по классификации S.J. Blott и K. Pye (2001, 2012) осадок Чухломского озера представлен слабо песчанистыми, слабо глинистыми средними и крупными (реже очень крупными) алевролитами, песчаная фракция в примеси имеет тонко- и мелкозернистую размерность. Крупные включения отсутствуют.

Значения МВ приведены (рис. 4) для низкой частоты 500 Hz. Характерные участки вариаций кривых (рис. 4) дают дополнительные основания для корреляции между кернами. Так, в слое опесчаненного минерального ила наблюдаются пиковые значения МВ в обоих кернах, хорошо согласующиеся по форме кривых.

В распределении медианного размера частиц (Md) силикатной части осадка по обоим колонкам наблюдается несколько пиков с повышенными

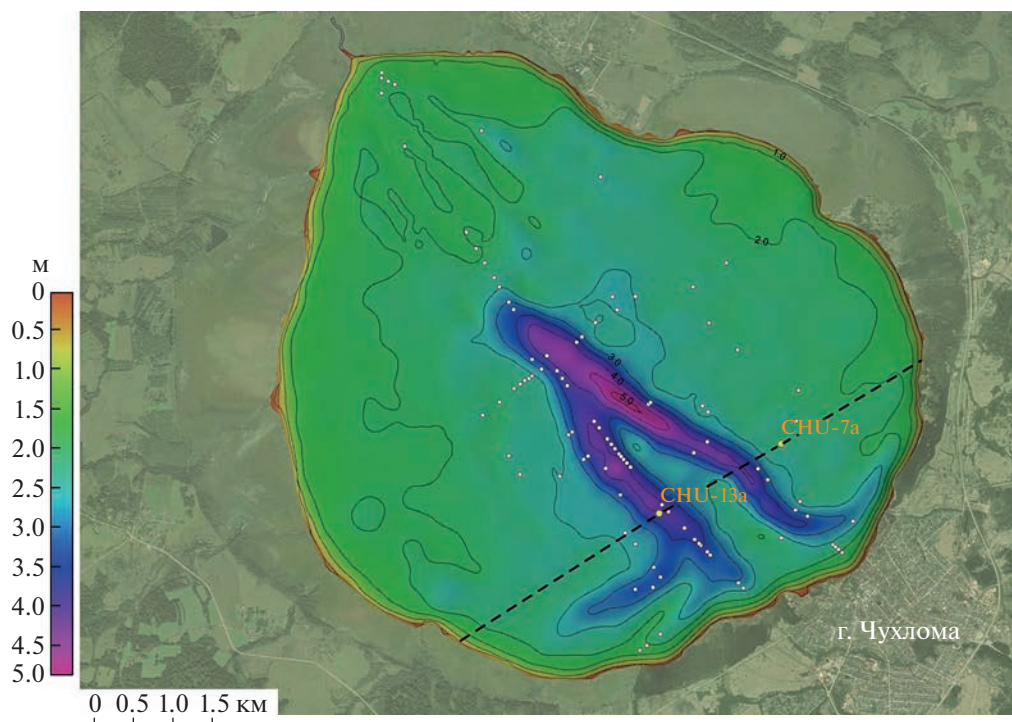


Рис. 2. Модель глубин Чухломского озера.

Белыми точками показаны места выхода подземных вод и/или разгрузки газов по данным эхолотирования и дешифрирования космических снимков. Пунктирная линия показывает расположение профиля, рассмотренного на рис. 5. Изобаты проведены через 0.5 м.

Fig. 2. Bathymetric model of Chukhlomskoe Lake.

White dots show the places of groundwater outlet and/or gas discharge according to echo sounding data and image space analysis. The dashed line shows the location of the profile considered in fig. 5. Isobaths are drawn every 0.5 m.

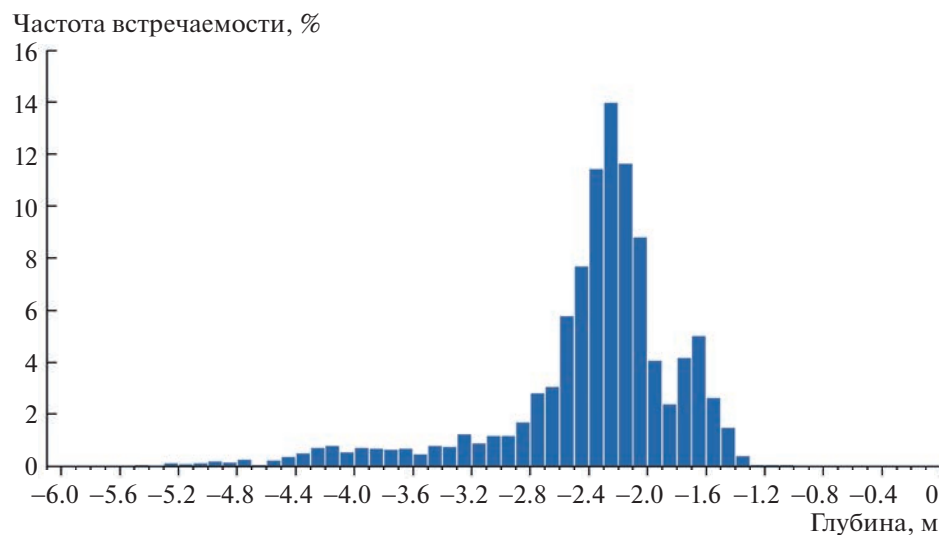
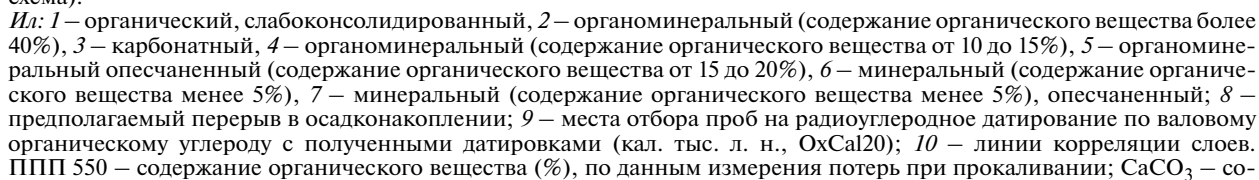


Рис. 3. Частота встречаемости различных глубин Чухломского озера по данным батиметрической съемки.

Fig. 3. Histogram of the frequency of Chukhlomskoe Lake depths according to bathymetric data.

ми значениями. Верхний пик в колонке Chu7A наблюдается на глубине 5.9 м (28.3 мкм), нижний, максимальный для всей колонки — на глубине 6.85 м (36.0 мкм). В колонке Chu13A им соответ-

ствуют значения верхнего пика на глубине 5.45 м (28.3 мкм) и нижнего — на глубине 6.65 м (24.9 мкм). А между ними на глубине 5.95–6.15 м выделяется опесчаненный прослой (32.3 мкм),



позволяющий выделить слой 4b, который отсутствует в колонке Chu7a. В обеих колонках пики содержания песчаной фракции предшествуют максимальным значениям содержания карбонатного вещества. В этих горизонтах повышенным значениям Md соответствуют и повышенные значения MB: в колонке Chu7a нижний пик значений наблюдается на глубине 6.85 м ($0.26 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$), а верхний — на глубине 6.0 м ($0.17 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$). В колонке Chu13a им соответствуют значения нижнего пика на глубине 6.7 м ($0.28 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$) и верхнего пика на глубине 5.4 м ($0.10 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$). Современный этап осадконакопления также характеризуется повышением значений MB в обеих колонках.

Осадок начинает значимо уплотняться с глубины 5.95 м ($0.23 \text{ г}/\text{см}^3$) в колонке Chu7a и глубины 5.45 м ($0.23 \text{ г}/\text{см}^3$) в колонке Chu13a. Граница минерального ила, опесчаненного в верхней части, хорошо заметна по следующему изменению плотности — 6.75 м ($1.17 \text{ г}/\text{см}^3$) в колонке Chu7a и 6.65 м ($1.29 \text{ г}/\text{см}^3$) в колонке Chu13a.

Ход кривой содержания органического вещества выявляет следующие закономерности: максимальное содержание органического вещества в колонке Chu7a наблюдается на глубине 4.8 м (52.4%), а в колонке Chu13a — на глубине 5.1 м (53.4%). Нижний пик содержания органического вещества в колонке Chu13a распложен на глубине 6.0 м (19.7%), а в колонке Chu7a он практически не выделяется и выглядит небольшим повышением (25.6% на глубине 5.9 м) на фоне общего снижения. Переход к стабильным для нижней части толщи значениям содержания органического вещества в колонке Chu7a происходит на глубине 6.75 м, а в колонке Chu13a — на глубине 6.5 м.

Графики изменения содержания CaCO_3 имеют высокое сходство и позволяют выделить слой карбонатного ила (слой 3) в обеих колонках.

Слой карбонатного ила является наиболее четким маркирующим горизонтом, его верхняя граница в двух колонках расположена на близкой абсолютной высоте: в колонке Chu7a она расположена всего на 0.35 м ниже, чем в колонке Chu13a. Абсолютные высоты пиковых значений остальных характеристик так же расположены близко — от 0.1 (плотность минерального ила и нижний пик содержания органического вещества) до

0.45 м (верхний пик содержания органического вещества и Md). Положение исследованных колонок в донном рельефе показано на рис. 5.

Возраст отложений Чухломского озера. Возраст отложений, определенный по колонке Chu13a методом AMS, представлен в табл. 3.

По результатам радиоуглеродного датирования для колонки Chu13a построена возрастная модель осадконакопления с использованием байесовского подхода в программе Rbaco (Blauw, Christen, 2011) (рис. 6). Согласно модели, основанной только на результатах AMS-датирования, возраст перерывов в осадконакоплении оценивается между 10.6 и 5.3 тыс. л. н. и между 4.8 и 1.3 тыс. л. н.

Исследования содержания радиоактивных изотопов верхней части колонки Chu13a выявили четкий пик содержания радиоактивного изотопа цезия ^{137}Cs ($5.7 \text{ кБк}/\text{м}^2$ на глубине 0.42 м от поверхности дна), соответствующий Чернобыльской катастрофе 1986 г. (Kuzmenkova et al., 2023). Распределение неравновесного свинца позволяет предположить, что слабоконсолидированные отложения до глубины 0.55 м накоплены не более, чем за последние 50–60 лет (рис. 6). Эти данные позволили скорректировать возраст второй эрозионной фазы и определить ее между 4.9 тыс. л. н. и 50–60 л. н.

Процессы в придонном слое осадка. Во время зимних полевых работ при общении с местным населением было выяснено, что на озере формируется неоднородный ледовый покров, и есть участки (полыны), где лед утончен или не образуется вовсе — так называемые “майны” или “ключи” (рис. 7). При маршрутном обследовании озерного льда было установлено, что для этих участков характерны газопроявления. В тонком прозрачном льду над несколькими “ключами” было зафиксировано скопление пузырей газа.

Помимо этого, донные осадки оказались пористыми — в разных колонках во время полевых работ пористость отмечена на глубинах от 6 до 11 м, что говорит о газонасыщенности отложений.

Эхолот Lowrance HDS-9 Live, оснащенный встроенным гидролокатором бокового обзора, позволил закартировать места выхода донных эманаций, попавшие в поле зрения по маршруту съемки

содержание карбоната кальция (%), по данным измерения потерь при прокаливании; MB — удельная магнитная восприимчивость ($\times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$); Md — медианный размер частиц, мкм.

Fig. 4. Structure, composition and age of bottom sediments of Chukhlomskoe Lake at two drilling sites (correlation scheme). 1 — organic silt, weakly consolidated, 2 — organomineral silt (organic matter content over 40%), 3 — carbonate silt, 4 — organomineral silt (content of organic matter from 10 to 15%), 5 — organomineral sandy silt (organic matter content from 15 to 20%), 6 — mineral silt (organic matter content less than 5%), 7 — mineral sandy silt (organic matter content less than 5%); 8 — supposed hiatus; 9 — AMS TOC sampling sites with obtained dates (cal ka yr BP, OxCal20); 10 — layers correlation lines. ППП 550 — organic matter content (%), according to loss on ignition; CaCO_3 — calcium carbonate content (%), according to loss on ignition; MB — mass magnetic susceptibility ($\times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$); Md — the median particle size, μm .

Таблица 1. Строение и состав отложений Чухломского озера, определенные по колонке Chu13A (в ложбине)
Table 1. The structure and composition of the sediments of Chukhlomskoe Lake, determined from core Chu13A (in a hollow)

Глубина от поверхности воды, м	Глубина от поверхности дна, м	Номер слоя	Описание слоя
4.00–4.50(4.60)	0.0–0.50(0.60)	1	Слабоконсолидированный органический ил, темно-оливковый, жидкий, МВ снижается от $0.28 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$ в верхней части слоя до $0.06 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$ в нижней части слоя (гранулометрический и вещественный состав не изучался).
4.50(4.60)–5.45	0.50(0.60)–1.45	2	Ил органоминеральный, буро-оливковый, слоистый (присутствуют прослои опесчаненного ила мощностью до 5 см), содержание органического вещества – 35.2–53.4%, содержание CaCO_3 – 2.6–7.0%, МВ – $0.02\text{--}0.1 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$, Мд – 16.2 мкм, ГАП – 9.5/81.4/9.1%. Средняя плотность осадка – 0.14 г/см^3 . Плохо сортирован (коэффициент сортировки – 2.9). Переход к нижележащему слою резкий, по цвету.
5.45–5.63	1.45–1.63	3	Ил карбонатный, светло-серый, массивный, содержание органического вещества – 33.8–17.7% (снижение содержания книзу слоя), содержание CaCO_3 – резкий пик до 51.4%, Мд – 21.6 мкм, МВ – $0.05\text{--}0.06 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$, ГАП – 13.5/76.2/10.2%. Средняя плотность – 0.29 г/см^3 . Плохо сортирован (коэффициент сортировки – 3.3). Переход к нижележащему слою резкий, по цвету.
5.63–5.95	1.63–1.95	4a	Ил органоминеральный, темно-серый, массивный, содержание органического вещества – 14.1–9.3% (снижение содержания книзу слоя), содержание CaCO_3 – 3.1–5.8%, МВ – $0.14\text{--}0.18 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$, Мд – 13.7 мкм, ГАП – 17.4/77.2/5.4%. Средняя плотность – 0.53 г/см^3 . Плохо сортирован (коэффициент сортировки – 3.1). Переход постепенный (отмечен по результатам лабораторных исследований).
5.95–6.15	1.95–2.15	4b	Ил органоминеральный, темно-серый, массивный, опесчаненный, содержание органического вещества – 19.7–15.0%, содержание CaCO_3 – 5.1–3.9%, МВ – $0.16\text{--}0.20 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$, Мд – резкий пик до 32.3 мкм, ГАП 9.1/76.0/14.9%. Средняя плотность – 0.43 г/см^3 . Плохо сортирован (коэффициент сортировки – 3.0). Переход постепенный (отмечен по результатам лабораторных исследований).
6.15–6.50	2.15–2.50	4c	Ил органоминеральный, темно-серый, массивный, содержание органического вещества 10.9–3.3% (снижение содержания книзу слоя), содержание CaCO_3 – 2.3–3.8%, МВ – $0.18\text{--}0.20 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$, Мд – 11.7 мкм, ГАП – 19.6/76.9/3.4%. Средняя плотность – 0.77 г/см^3 . Плохо сортирован (коэффициент сортировки – 3.1). Переход резкий (отмечен по результатам лабораторных исследований).

Таблица 1. Окончание

Глубина от поверхности воды, м	Глубина от поверхности дна, м	Номер слоя	Описание слоя
6.50–6.85	2.50–2.85	5	Ил органоминальный, темно-серый, массивный, опесчаненный, содержание органического вещества – 1.6–3.7%, содержание CaCO_3 – 1.9–4.5%, МВ – резкий пик до $0.28 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$, Мд – пик до 24.9 мкм, ГАП – 16.5/72.7/13.7%. Средняя плотность – 1.19 г/см ³ . Плохо сортирован (коэффициент сортировки – 3.4). Переход резкий (отмечен по результатам лабораторных исследований).
6.85–11.45	2.85–7.45	6	Ил минеральный, серый, слоистый (встречаются опесчаненные прослои мощностью до 5 см), содержание органического вещества – 1.5–4.0%, содержание CaCO_3 – 5.3–13.3%, МВ – $0.16\text{--}0.23 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$, Мд – 16.1 мкм, ГАП – 19.6/73.0/7.4%. Средняя плотность – 1.26 г/см ³ . Плохо сортирован (коэффициент сортировки – 3.6). Пористость отмечена на глубинах ниже 10.2 м. Забой на глубине 11.45 м.

Примечание. МВ – удельная магнитная восприимчивость; Мд – медианный размер частиц (мкм, среднее значение для слоя); ГАП – соотношение глина/алеврит/песок (%), средние значения для слоя).

Note. MB – mass magnetic susceptibility; Md – median particle size (μm , average value for the layer); GAП – clay/silt/sand ratio (%), average values for the layer).

(с этим связана прямолинейная локализация части точек). К этим данным были добавлены результаты, полученные с помощью дешифрирования космических снимков. Все обнаруженные участки донных эманацй представлены на рис. 2.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты исследования вещественного состава донных отложений Чухломского озера в обеих колонках позволили провести корреляцию и определить различия в строении толщи, а полученные датировки и построенная модель осадконакопления – выделить этапы формирования осадка.

Нижние слои осадка (5 и 6) в обеих колонках обладают высоким сходством. Этап накопления минерального ила завершился 18–16 тыс. л. н., когда резко возросло содержание песчаной фракции в осадке и значения МВ достигли максимальных значений. В интервале 16–11 тыс. л. формируется органоминальный ил с содержанием органического вещества до 10–15% (слои 4а и 4с колонки Chu13A и слой 4 колонки Chu7A). В колонке Chu13A выделяется слой 4b, он богат органическим веществом (до 15–20%) и отличается повышенным содержанием песка. Такой слой в колонке Chu7A не наблюдается. Накопление слоя карбонатного ила (слой 3) произошло 11–10 тыс. л. н. Между 10.6 и 5.3 тыс. л. н. произошел разрыв части донных отложений на участке

Chu13A. В колонке Chu7A размыта в этом интервале не обнаружено. Вышележащий слой 2 представлен в колонке Chu7A гораздо более мощной толщей органоминального ила (3.2 м против 0.85 м в керне Chu13A). Следовательно, голоценовая последовательность осадка в ложбине заметно сокращена по сравнению со строением осадка на участках фоновых глубин. Второй эпизод размыта в колонке Chu13A фиксируется после 4870 ± 210 кал. л. н.

Вероятно, разрыв прекратился, когда сток озера начал регулироваться хозяйственной деятельностью человека. Шандорная переливная плотина на р. Вёксе была построена в 1963 г., подняв уровень воды в озере на 1.0–1.5 м (Румянцев и др., 2015). Наличие в ложбине осадка, содержащего радиоизотопы ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, подтверждает процесс современного осадконакопления в ней, а не продолжающийся разрыв. При этом по колонке отложений не определяются нижние пики глобального выпадения цезия 1958 и 1963 г. По всей видимости, на тот момент процесс выноса материи из ложбины еще продолжался, а перестройка процессов осадконакопления происходила постепенно после строительства плотины. На современном этапе формируется слой слабоконсолированного неуплотненного темно-оливкового органического ила.

В донном рельефе северной части озера, вблизи истока реки Вёксы нет признаков переуглубления. Морфология ложбин указывает на то, что

Таблица 2. Строение и состав отложений Чухломского озера, определенные по колонке Chu7A (на поверхности фоновых глубин)**Table 2.** The structure and composition of the sediments of Chukhlomskoe Lake, determined from core Chu7A (background depths surface)

Глубина от поверхности воды, м	Глубина от поверхности дна, м	Номер слоя	Описание слоя
2.00–2.80	0.00–0.80	1	Слабоконсолидированный органический ил, темно-оливковый, жидкий. Верхние 60 см осадка в лаборатории не исследовались. Характеристики для нижней части слоя (2.60–2.80 м): содержание органического вещества – 42.6–46.9%, содержание CaCO_3 – 3.3–4.6%, МВ – $0.09–0.17 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$, Мд – 13.5 мкм, ГАП – 18.2/74.1/7.7%. Средняя плотность осадка – 0.16 г/см^3 . Плохо сортирован (коэффициент сортировки – 3.5). Переход к нижележащему слою постепенный.
2.80–5.80	0.80–3.80	2	Ил органоминаральный, буро-оливковый, слоистый (присутствуют прослои опесчаненного ила мощностью до 5–10 см), содержание органического вещества – 40.8–52.4%, содержание CaCO_3 – 0.0–11.5%, МВ – 0.01–0.08, Мд – 15.9 мкм, ГАП – 14.6/74.5/10.9%. Средняя плотность осадка – 0.16 г/см^3 . Плохо сортирован (коэффициент сортировки – 3.5). Переход к нижележащему слою резкий, по цвету.
5.80–6.00	3.80–4.00	3	Ил карбонатный, светло-серый, массивный, содержание органического вещества – 24.4–28.4% (снижение содержания книзу слоя), содержание CaCO_3 – резкий пик до 43.7%, Мд – 21.7 мкм, МВ – $0.07–0.13 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$, ГАП – 15.5/74.2/10.4%. Средняя плотность – 0.21 г/см^3 . Плохо сортирован (коэффициент сортировки – 3.5). Переход к нижележащему слою резкий, по цвету.
6.00–6.75	4.00–4.75	4	Ил органоминаральный, темно-серый, массивный, содержание органического вещества – 7.8–1.9% (снижение содержания книзу слоя), содержание CaCO_3 – 3.7–8.1%, МВ – $0.15–0.19 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$, Мд – 11.7 мкм, ГАП – 23.0/74.3/2.6%. Средняя плотность – 0.91 г/см^3 . Плохо сортирован (коэффициент сортировки – 3.4). Пористость отмечена на глубинах 6.00–6.20 м. Переход постепенный (отмечен по результатам лабораторных исследований).
6.75–7.10	4.75–5.10	5	Ил органоминаральный, темно-серый, массивный, опесчаненный, содержание органического вещества – 1.4–2.6%, содержание CaCO_3 – 2.3–6.3%, МВ – $0.22–0.26 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$, Мд – резкий пик до 36.0 мкм, ГАП 16.6/69.6/13.9%. Средняя плотность – 1.21 г/см^3 . Плохо сортирован (коэффициент сортировки – 3.7). Переход постепенный (отмечен по результатам лабораторных исследований).
7.10–11.45	5.10–9.45	6	Ил минеральный, серый, слоистый (встречаются опесчаненные прослои мощностью до 5 см), содержание органического вещества – 1.6–4.2%, содержание CaCO_3 – 5.6–11.5%, МВ – $0.14–0.22 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$, Мд – 14.8 мкм, ГАП – 21.3/72.0/6.6%. Средняя плотность – 1.27 г/см^3 . Плохо сортирован (коэффициент сортировки – 3.7). Забой на глубине 11.45 м.

Примечание. МВ – удельная магнитная восприимчивость; Мд – медианный размер частиц (мкм, среднее значение для слоя); ГАП – соотношение глина/алеврит/песок (%; средние значения для слоя).

Note. MB – mass magnetic susceptibility; Md – median particle size (μm , average value for the layer); GAP – clay/silt/sand ratio (%; average values for the layer).

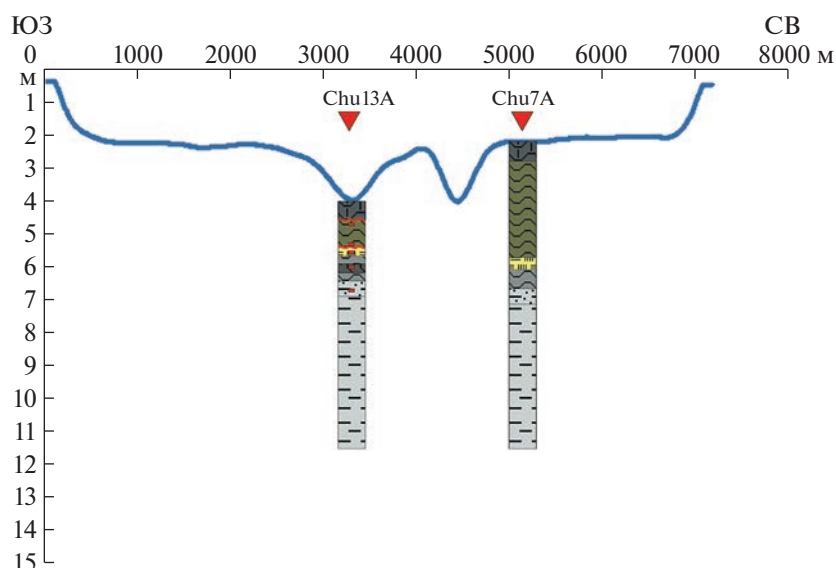


Рис. 5. Профиль дна Чухломского озера и строение донных отложений в ложбине и на фоновой поверхности. Положение линии профиля см. на рис. 2. Усл. обозначения к колонкам см. на рис. 4.

Fig. 5. Profile of the bottom of Chukhlomskoe Lake and the structure of bottom sediments in the hollow and on the background surface.

For the location of the profile see the dashed line on fig. 2. For symbols see fig. 4.

они могли быть созданы под воздействием эродирующего потока, а наши данные по строению отложений указывают на размыв донного осадка сверху в голоцене. Субгоризонтальное залегание доголоценовых озерных отложений позволяет отклонить гипотезы о карстовом или тектоническом генезисе ложбин, а также о проекции древнего рельефа на современную поверхность. Вдольбереговой загиб ложбин у г. Чухломы говорит о том, что размыв в придонном слое происходит от центра озера в ЮВ направлении.

Вероятно, что в формировании ложбин принимают участие придонные течения, которые

размывают отложения в наиболее турбулентной зоне — местах выхода подземных вод и/или зоне разгрузки газов, накапливающихся в толще озерных илов.

Механизмы формирования ветровой циркуляции воды в неглубоких озерах были подробно рассмотрены Бикбулатовым и др. (2003) при исследованиях, проведенных на сопоставимом по размеру и истории оз. Неро. В результате проведенных ими измерений было выявлено, что при ЮЗ ветре скоростью 5.5 м/с перенос воды у западного и восточного берегов происходил в направлении ветра и характеризовался однонаправ-

Таблица 3. Возраст отложений Чухломского озера, определенный для колонки Chu13A методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS) по валовому органическому углероду

Table 3. Age of Chukhlomskoe Lake sediments determined for Chu13A core by the AMS method (total organic carbon)

Лабораторный номер	Глубина от поверхности дна, м	^{14}C yr, BP (1σ)	Cal BP (yr) IntCal20 (1σ) (Reimer et al., 2020)
IGAN _{AMS} 9351	0.70	4450 ± 25	5110 ± 110
IGAN _{AMS} 9352	1.30	4455 ± 25	5130 ± 100
IGAN _{AMS} 9353	1.55	9580 ± 30	10930 ± 110
IGAN _{AMS} 9354	2.00	11050 ± 30	12990 ± 60
IGAN _{AMS} 9355	2.70	14670 ± 45	18000 ± 90

Примечание. ^{14}C yr, BP — радиоуглеродный возраст осадка; Cal BP (yr) IntCal20 — возраст осадка в годах, отсчитанный от 1950 г., калиброванный по шкале IntCal20; σ — среднеквадратическое отклонение.

Note. ^{14}C yr, BP — the radiocarbon age of the sediment; Cal BP (yr) IntCal20 — the age of the sediment in years, counted from 1950, calibrated using the IntCal20 scale; σ — standard deviation.

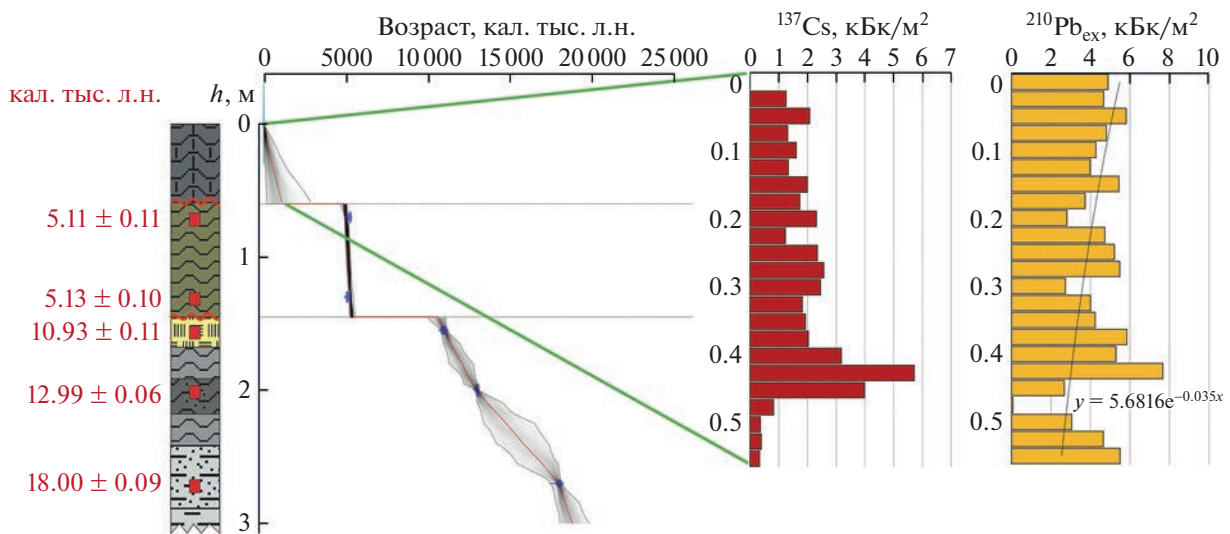


Рис. 6. Модель осадконакопления верхней части донных отложений Чухломского озера и распределение радиоактивных изотопов в слабоконсолидированном иле (по колонке Chu13A, в днище ложбины).

Fig. 6. Sedimentation model for the upper part of Chukhlomske Lake bottom sediments and the distribution of radioactive isotopes in weakly consolidated silt (Chu13A core, in a hollow).

ленностью от поверхности до дна. В глубокой центральной части сформировалось компенсационное течение против ветра, также отличающееся одинаковым направлением по глубине. Скорость дрейфового и компенсационного течений в оз. Неро составила 3.5–5.5 см/с. Эти данные позволили Бикбулатову и др. сопоставить тип циркуляции воды в оз. Неро с механизмом, описанным J.H.G. Verhagen (1994), когда в озере переменной глубины при средних по скорости ветрах в центральной ча-

сти водоема формируется противоположный направлению ветра компенсационный поток.

По данным архива погоды метеостанции г. Чухлома (<https://rp5.md>) за 2012–2023 гг. составлена роза ветров для безледного периода (май–октябрь) (рис. 8). Преобладающими явля-



Рис. 7. Участки тонкого льда на Чухломском озере. Фото К.Г. Филипповой.

Fig. 7. Areas with thin ice on Chukhlomske Lake. Photo by K.G. Filippova.

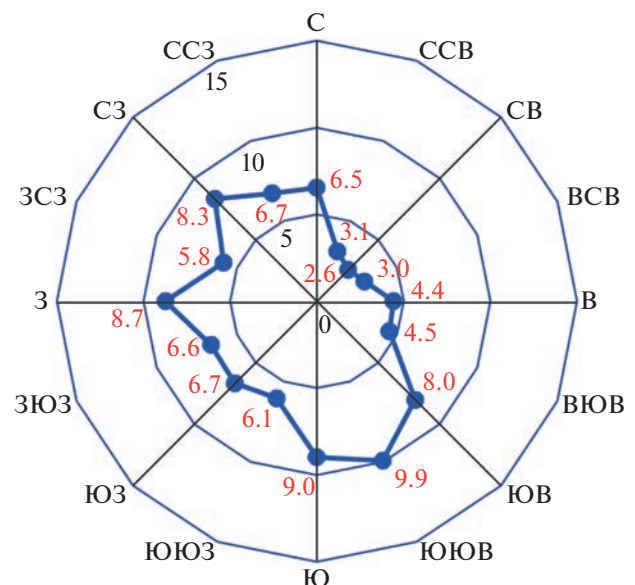


Рис. 8. Повторяемость румбов преобладающих ветров в безледный период (май–октябрь), % (по данным архива погоды метеостанции г. Чухлома за 2012–2023 гг.).

Fig. 8. Prevailing winds frequency during the ice-free period (May–October), % (according to weather database of Chukhloma meteorological station, 2012–2023).

ются ветры Ю, ЮЮВ и ЮВ румбов (в сумме 26.9%), доля СЗ и ССЗ румбов — 15%.

Восточная ложбина, являющаяся наиболее глубокой и прямой, простирается с СЗ на ЮВ.

Для дальнейшего уточнения характеристик подводных течений и механизма ветрового воздействия на донный рельеф Чухломского озера необходимо провести более детальные гидрологические исследования.

ВЫВОДЫ

1. Сравнительный анализ строения донных отложений в скважинах, заложенных на разных геоморфологических позициях (в ложбине и на субгоризонтальной поверхности фоновых глубин) показал, что ложбины имеют эрозионное происхождение.

2. Вероятным механизмом происхождения ложбин являлась локализованная эрозия, вызванная ветровыми течениями. Дополнительным фактором эрозии могла выступать дегазация донных отложений, приводящая к разрыхлению придонного осадка, что делало его податливым для размыва.

3. По результатам радиоуглеродного датирования установлено, что ложбины имеют голоценовый возраст. Выявлено два этапа эрозии озера дна. Возраст первой эрозионной фазы определяется по модели осадконакопления между 10.6 и 5.3 кал. тыс. л. н., а второй — между 4.9 кал. тыс. л. н. и 50–60 л. н.

4. По данным измерения содержания радиоактивных изотопов свинца и цезия в верхней части донного осадка установлено, что размыв отложений в ложбинах прекратился в одно время со строительством плотины на р. Вёксе в 1960-е гг.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Мегагранта (соглашение № 075-15-2021-599 от 08.06.2021) “Палеоэкологические реконструкции как ключ к пониманию прошлых, текущих и будущих изменений климата и окружающей среды в России” (бурение донных отложений и обследование берегов), и государственного задания Института географии РАН № AAAA-A19-119022190168-8 (FMGE-2019-0010) (батиметрическая съемка) и проекта Российского научного фонда № 23-77-10063 (лабораторно-аналитические исследования).

Авторы выражают благодарность Д.В. Баранову, А.В. Баранской, Н.Г. Константиновой, В.В. Мацковскому, П.А. Морозовой, А.И. Рудинской, Н.В. Сычеву за участие в экспедиционных работах, Е.О. Мухаметшиной за помощь в лабораторной обработке кернов и Э.П. Зазовской за проведение радиоуглеродного датирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранов И.В., Терешин А.Б. (1981). Гидрохимический режим Галичского и Чухломского озер (Костромская обл.) по результатам исследований 1979 г. // Сборник научных трудов ГОСНИОРХ. Вып. 164. Л.: ГОСНИОРХ. С. 58–67.
- Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Литвинов А.С. и др. (2003). Гидрология и гидрохимия озера Неро. Рыбинск: Рыбинский дом печати. 193 с.
- Геологическая карта СССР. Карта четвертичных отложений. Серия Мезенская, лист О–38–VII, масштаб: 1:200000. (1972) / Под ред. З.И. Бороздиной. М.: Всесоюзный аэрогеологический трест Министерства геологии СССР.
- Гидрогеологическая карта СССР. О–38–VII. Серия Мезенская. Масштаб 1:200 000. (1973) / Под ред. А.В. Журавлева. Л.: Аэрогеология.
- Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 2. Озера и водохранилища. Т. 1. РСФСР. Вып. 23. Бассейн Волги (верхнее течение). (1986). Л.: Гидрометеиздат. 173 с.
- Грачев А. (1902). О некоторых озерах Костромской губернии. М.: Типо-лит. Т-ва И.Н. Кушнерев и К°. 17 с.
- Гурин Э.В. (1993). Отчет о детальной разведке озерного месторождения сапропеля “Чухломское” (северо-западная часть Чухломского района, Костромской области). Ярославль: Торфгеология. 102 с.
- Жузе А.П. (1939). Палеогеография водоемов на основе диатомового анализа // Тр. Верхневолжск. эксп. Геогр.-экон. ин-та ЛГУ. Вып. 4. Ленинград. 85 с.
- Кордун Б.М., Журавлев А.В., Сангатулина Д.Г. и др. (1965). Отчет Судайской гидрогеологической партии о комплексной геолого-гидрогеологической съемке масштаба 1:200 000, проведенной в 1963–1965 гг.: Геологическое строение, гидрогеологические условия и полезные ископаемые территории листа О–38–VII. М.: 383 с.
- Марков К.К. (1940). Материалы к стратиграфии четвертичных отложений бассейна Верхней Волги // Тр. Верхневолжск. эксп. АН СССР. Вып. 1. 62 с.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Многолетние наблюдения. Сер. 3. Ч. 1–6. Вып. 29. Кировская, Костромская, Ярославская, Ивановская, Владимирская, Горьковская, Рязанская области, Удмуртская, Марийская, Чувашская, Мордовская АССР. (1992). СПб.: Гидрометеиздат. 583 с.
- Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. (2015). Озера Европейской части России. СПб: ЛЕМА. 392 с.
- Сиротина М.В., Воронцова Е.Л. (2016). Структура зимнего зоопланктона Чухломского озера // НАУ. № 2 (18). С. 87–90.
- Стахевич В.Л. (1959). Материалы изысканий озер “Галичское” и “Чухломское” Галичского и Чухломского районов, Костромской области. М.: Главторффонд РСФСР. 55 с.
- Тимофеева Л.А., Юхно А.В. (2019). Гидрологические факторы функционирования экосистем озер Галичское и Чухломское // Озера Евразии: проблемы

- и пути их решения / Мат-лы II Междунар. конф. Казань: Академия наук Республики Татарстан. С. 337–342.
- Чердниченко Б.Ф. (1987). Перспективы развития рыбоводства на Галичском и Чухломском озерах // Природа Костромской области и ее охрана. Ярославль: Верхневолжск. кн. изд-во. С. 40–45.
- Чернов А. (1930). Материалы к изучению Чухломского озера (из работ Биологической станции Костромского научного общества) // Известия Костромского науч. о-ва по изуч. местного края. Вып. 2–3. С. 19–30.
- Штурм Л.Д. (1932). Предварительный отчет о зимней экспедиции в Галичский, Чухломской и Семеновский районы в 1931 г. // Известия Сапропелевого комитета. Вып. 6. Л.: Изд-во АН СССР. С. 71–78.
- Bengtsson L., Enel M. (1986). Chemical analysis // Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology. Berglund B.E. (Ed). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. P. 423–451.
- Blaauw M., Christen J.A. (2011). Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process // Bayesian Anal. Vol. 6. No. 3. P. 457–474. <https://doi.org/10.1214/11-BA618>
- Blott S.J., Pye K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments // Earth Surf. Process. Landforms. Vol. 26. P. 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Blott S.J., Pye K. (2012). Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: Review and recommended procedures // Sedimentology. Vol. 59. No. 7. P. 2071–2096. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01335.x>
- Corbett D.R., Walsh J.P. (2015). ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cesium: Establishing a Chronology for the Last Century // Handbook of Sea-Level Research. I. Shennan, A.J. Long, B.P. Horton (Eds). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. P. 361–372. <https://doi.org/10.1002/9781118452547.ch24>
- Dean W.E. (1974). Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; comparison with other methods // J. Sediment. Petrol. Vol. 44. No. 1. P. 242–248. <https://doi.org/10.1306/74D729D2-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results // J. Paleolimnol. No. 25. P. 101–110. <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- Konstantinov E.A. (2019). A New Technology of Coring for Bottom Soft Sediments // Oceanology. Vol. 59. P. 791–796. <https://doi.org/10.1134/S0001437019050084>
- Kuzmenkova N., Golosov V., Ivanov M. et al. (2023). Bottom sediment radioactivity of the six Caucasus lakes located in different altitude zones // Environmental Science and Pollution Research. Online 17.02.2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25838-4>
- Maher B.A. (1998). Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Vol. 137 (1–2). P. 25–54.
- Özer M., Orhan M., Isik N.S. (2010). Effect of Particle Optical Properties on Size Distribution of Soils Obtained by Laser Diffraction // Bull. Assoc. Eng. Geol. Vol. 16. No. 2. P. 163–173. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.16.2.163>
- Reimer P., Austin W.E.N., Bard E. et al. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP) // Radiocarbon. Vol. 62. No. 4. P. 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Verhagen J.H.G. (1994). Modeling phytoplankton patchiness under the influence of wind-driven currents in lakes // Limnology and Oceanology. Vol. 39. No. 7. P. 1550–1565. <https://doi.org/10.4319/lo.1994.39.7.1551>
- Wright H.E. (1967). A square-rod piston sampler for lake sediments // Journal of Sedimentary Research. Vol. 37. No. 3. P. 975–976.

STRUCTURE AND ORIGIN OF THE BOTTOM RELIEF OF LAKE CHUKHLOMSKOE (KOSTROMA REGION)¹

K. G. Filippova^{a, #}, E. A. Konstantinov^a, A. L. Zakharov^a, N. V. Kuzmenkova^{a, b},
A. A. Medvedev^a, and M. G. Melnikov^c

^aInstitute of Geography RAS, Moscow, Russia

^bLomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry, Moscow, Russia

^cFaculty of Geography and Geoinformation Technology, HSE, Moscow, Russia

[#]E-mail: xenia.filippova@igras.ru

The article discusses the first results of studying the structure of the bottom topography and bottom sediments of Chukhlomskoe Lake (Kostroma Region, Chukhlomsky District). We analyzed the lake bottom topography based on the results of our bathymetric survey and discovered two hollows with maximum depths diverging

¹ For citation: Filippova K.G., Konstantinov E.A., Zakharov A.L. et al. (2023). Structure and origin of the bottom relief of Lake Chukhlomskoe (Kostroma Region). *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 54. No. 4. P. 145–162. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178923040047>; <https://elibrary.ru/HRXGEY>

from the lake's center towards the city of Chukhloma. The maximum depth inside the hollows (and for the entire lake) reaches 5.4 m, and the average lake depth is 2.2 m. There are two steps seen in the bottom topography; 2.0–2.4 m and 1.5–1.8 m. The bottom sediment structure of Chukhlomskoe Lake was revealed by drilling from the ice with two boreholes (with lengths of 9.45 and 7.45 m, located in the area of background depths and inside the hollow, respectively). Five radiocarbon AMS dates were obtained for the core from the hollow's bottom. The sedimentary sequences of the pre-Holocene part of both cores show high similarity in structure and depths of the marker horizons identified by a set of lithological analyses. The structure and thickness of Holocene sediments differ significantly. In the area of background depths, the Holocene organo-mineralogenic silt is 3.8 m, and inside the hollow, the thickness of this layer is only 1.45 m. Moreover, hiatuses in sedimentation were documented in the structure of the Holocene sediment inside the hollow. The age of hiatuses, based on the sedimentary model, was estimated as 10.6–5.3 and 4.9–0.06 thousand years ago. A probable mechanism for the origin of hollows is localized erosion caused by wind currents in a highly shallow lake. An additional erosion factor can be the degassing of bottom sediments, which leads to the loosening of the bottom layer of sediments, which makes them susceptible to erosion. The cutoff of sediment erosion inside the hollow coincided in time with the construction of a dam on the Veksa River and a rise in the lake level by 1.0–1.5 m in the 1960s.

Keywords: lake bottom topography, lacustrine deposits, lithological studies, radiocarbon dating, paleolimnology, bottom relief genesis

ACKNOWLEDGMENTS

The work was funded by the Megagrant project (agreement No. 075-15-2021-599, 8.06.2021) "Paleoenvironmental reconstructions as a key to understanding past, current and future climate and environmental changes in Russia" (bottom sediments drilling and research on the coast), and the state task of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences No. AAAA-A19-119022190168-8 (FMGE-2019-0010) (bathymetric survey), and Russian Science Foundation project No. 23-77-10063 (laboratory and analytical studies).

The authors are grateful to D.V. Baranov, A.V. Barsanskaya, N.G. Konstantinova, V.V. Matskovsky, P.A. Morozova, A.I. Rudinskaya, N.V. Sychev for participation in fieldwork, E.O. Mukhametshina for assistance in laboratory, and E.P. Zazovskaya for radiocarbon dating.

REFERENCES

- Baranov I.V., Tereshin A.B. (1981). Hydrochemical regime of the Galich and Chukhloma lakes (Kostroma region) based on the results of studies in 1979. *Sbornik nauchnikh trudov GOSNIORKH. Vol. 164*. Leningrad: GOSNIORKH (Publ.). P. 58–67. (in Russ.)
- Bengtsson L., Enel M. (1986). Chemical analysis. *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*. Berglund B.E. (Ed). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. P. 423–451.
- Bikbulatov E.S., Bikbulatova E.M., Litvinov A.S. et al. (2003). *Gidrologiya i gidrokhimiya ozera Nero* (Hydrology and hydrochemistry of lake Nero). Rybinsk: Rybinskii dom pečati (Publ.). 193 p. (in Russ.)
- Blaauw M., Christen J.A. (2011). Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Anal.* Vol. 6. No. 3. P. 457–474. <https://doi.org/10.1214/11-BA618>
- Blott S.J., Pye K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Process. Landforms*. Vol. 26. P. 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Blott S.J., Pye K. (2012). Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: Review and recommended procedures. *Sedimentology*. Vol. 59. No. 7. P. 2071–2096. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01335.x>
- Borozdina Z.I. (Ed.). (1972). *Geologicheskaya karta SSSR. Karta chetvertichnykh otlozhenii. Seriya Mezenskaya, list O-38-VII, masshtab 1:200000* (Geological map of the USSR. Map of Quaternary deposits. Mezenskaya series, O-38-VII, scale 1:200000). Moscow: Vsesoyuz. aerogeol. trest (Publ.). (in Russ.)
- Cherednichenko B.F. (1987). Prospects for the development of fish farming on the Galich and Chukhloma Lakes. *Priroda Kostromskoi oblasti i ee okhrana*. Yaroslavl: Verkhnevolzhsk. kn. izd-vo (Publ.). P. 40–45. (in Russ.)
- Chernov A. (1930). Data on the Chukhlomskoe lake study (the works of the Biological Station of Kostroma Scientific Society). *Izvestiya Kostromskogo nauch. obshch. po izuch. mestnogo kraja*. Vol. 2–3. P. 19–30. (in Russ.)
- Corbett D.R., Walsh J.P. (2015). ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs: Establishing a Chronology for the Last Century. *Handbook of Sea-Level Research*. I. Shennan, A.J. Long, B.P. Horton (Eds). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. P. 361–372. <https://doi.org/10.1002/9781118452547.ch24>
- Dean W.E. (1974). Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; comparison with other methods. *J. Sediment. Petrol.* Vol. 44. No. 1. P. 242–248. <https://doi.org/10.1306/74D729D2-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi. Chast' 2. *Ozera i vodokhranilishcha*. Tom 1. RSFSR. Vol. 23. Bassein Volgi (verkhnee techenie). (State water cadastre. Long-term data on the regime and resources of land surface waters. Part 2. Lakes and reservoirs. Iss. 1. RSFSR. Vol. 23. Volga basin (upper flow)) (1986). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.). 173 p. (in Russ.)
- Grachev A. (1902). *O nekotorykh ozerakh Kostromskoi gubernii* (About some lakes in Kostromskaya Province).

- Moscow: Tipo-lit. T-va I.N. Kushnerev i K° (Publ.). 17 p. (in Russ.)
- Gurin E.V. (1993). Otchet o detal'noi razvedke ozernogo mestorozhdeniya sapropelya "Chukhlomskoe" (severo-zapadnaya chast' Chukhlomskogo raiona, Kostromskoi oblasti) (Report on detailed exploration of the lake deposit of sapropel "Chukhlomskoe" (north-western part of the Chukhlomsky District, Kostroma Region)). Yaroslavl': Torfgeologiya (Publ.). 102 p. (in Russ.)
- Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. Paleolimnol.* No. 25. P. 101–110. <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- Konstantinov E.A. (2019). A New Technology of Coring for Bottom Soft Sediments. *Oceanology*. Vol. 59. P. 791–796. <https://doi.org/10.1134/S0001437019050084>
- Kordun B.M., Zhuravlev A.V., Sangatulina D.G. et al. (1965). Otchet Sudaiskoi gidrogeologicheskoi partii o kompleksnoi geologo-gidrologicheskoi s'emke masshtaba 1:200 000, provedennoi v 1963–1965 gg.: Geologicheskoe stroenie, gidrogeologicheskie usloviya i poleznye iskopaemye territorii lista O-38-VII (Report of the Sudai Hydrogeological Party on the integrated geological and hydrogeological survey at a scale of 1:200 000, carried out in 1963–1965: Geological structure, hydrogeological conditions and minerals of the O-38–VII sheet territory). Moscow. 383 p. (in Russ.)
- Kuzmenkova N., Golosov V., Ivanov M. et al. (2023). Bottom sediment radioactivity of the six Caucasus lakes located in different altitude zones. *Environmental Science and Pollution Research*. Online 17.02.2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25838-4>
- Maher B.A. (1998). Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. Vol. 137 (1–2). P. 25–54.
- Markov K.K. (1940). Materials for the stratigraphy of the Quaternary deposits of the Upper Volga basin. *Trudy Verkhnevolzhskoy ekspeditsii. AN SSSR. Vol. 1.* Leningrad. 62 p. (in Russ.)
- Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Mnogoletnie nablyudeniya. Ser. 3. Chast' 1–6. Vyp. 29. Kirovskaya, Kostromskaya, Yaroslavskaia, Ivanovskaya, Vladimirskaya, Gorkovskaya, Ryazanskaya oblasti, Udmurtskaya, Mariiskaya. Chuvashskaya, Mordovskaya ASSR (Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Long term observations. Series 3. Part 1–6. Vol. 29. Kirov, Kostroma, Yaroslavl, Ivanovo, Vladimir, Gorky, Ryazan regions, Udmurt, Mari, Chuvash, Mordovian ASSR). (1992). Saint Petersburg: Gidrometeoizdat (Publ.). 583 p. (in Russ.)
- Özer M., Orhan M., Isik N.S. (2010). Effect of Particle Optical Properties on Size Distribution of Soils Obtained by Laser Diffraction. *Bull. Assoc. Eng. Geol.* Vol. 16. No. 2. P. 163–173. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.16.2.163>
- Reimer P., Austin W.E.N., Bard E. et al. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*. Vol. 62. No. 4. P. 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Rumyantsev V.A., Drabkova V.G., Izmailova A.V. (2015). Oзера Evropeiskoi chasti Rossii (Lakes of European Russia). Saint-Petersburg: LEMA (Publ.). 392 p. (in Russ.)
- Shturm L.D. (1932). Preliminary report on the winter expedition to Galichsky, Chukhlomsky and Semenovskiy districts in 1931. *Izvestiya Sapropelevogo komiteta. Vol. 6.* Leningrad: AN SSSR (Publ.). P. 71–78. (in Russ.)
- Sirotnina M.V., Vorontsova E.L. (2016). The structure of winter zooplankton in Chukhlomskoe Lake. *NAU*. No. 2 (18). P. 87–90. (in Russ.)
- Stakhnevich V.L. (1959). Materialy izyskanii ozer "Galichskoe" and "Chukhlomskoe" Galichskogo and Chukhlomskogo raionov, Kostromskoi oblasti (Materials of surveys of lakes "Galichskoe" and "Chukhlomskoe" of Galich and Chukhlomsky districts, Kostroma region). Moscow: Glavtorffond RSFSR (Publ.). 55 p. (in Russ.)
- Timofeeva L.A., Yukhno A.V. (2019). Hydrological factors of functioning of Galich and Chukhlomskoe lakes ecosystems. *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya. Mat-ly II Mezhdunar. konf.* Kazan: Academy of Sciences of the republic of Tatarstan Akademiyaya nauk Respubliki Tatarstan (Publ.). P. 337–342. (in Russ.)
- Verhagen J.H.G. (1994). Modeling phytoplankton patchiness under the influence of wind-driven currents in lakes. *Limnology and Oceanology*. Vol. 39. No. 7. P. 1550–1565. <https://doi.org/10.4319/lo.1994.39.7.1551>
- Wright H.E. (1967). A square-rod piston sampler for lake sediments. *Journal of Sedimentary Research*. Vol. 37. No. 3. P. 975–976.
- Zhuravlev A.V. (Ed.). (1973). Gidrogeologicheskaya karta SSSR. O-38-VII. Seriya Mezenskaya. Masshtab 1:200 000 (Hydrogeological map of the USSR. O-38-VII. Mezenskaya series. Scale 1:200 000). Leningrad: Aero-geologiya (Publ.). (in Russ.)
- Zhuze A.P. (1939). Paleogeography of water bodies based on diatom analysis. *Tr. Verkhnevolzhskoi ekspeditsii. Geogr.-ekon. in-ta LGU. Vol. 4.* Leningrad. 85 p. (in Russ.)