

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.4.042

СКОРОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ГОРНЫХ ОЗЕРАХ КАВКАЗА КАК ИНДИКАТОРЫ ТЕМПОВ ДЕНУДАЦИИ НА ИХ ВОДОСБОРАХ

© 2023 г. Н. В. Кузьменкова^{a, b, *}, В. Н. Голосов^{a, c}, Е. А. Грабенко^a, М. Ю. Александрин^a,
В. А. Шишков^a, О. Н. Быхалова^d

^aИнститут географии РАН, Москва, Россия

^bХимический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^cГеографический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^dФГБУ “Государственный заповедник “Утриш”, Анапа, Россия

*e-mail: kuzmenkovanv@my.msu.ru

Поступила в редакцию 04.04.2022 г.

После доработки 18.08.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

Исследованы темпы осадконакопления пяти озер Западного и Центрального Кавказа в позднем голоцене на основе радиоизотопного датирования (^{137}Cs глобального и Чернобыльского происхождения, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{14}C). Озера расположены в различных ландшафтных зонах и отличаются по своему происхождению. Водосборы исследованных озер минимально подвержены антропогенному воздействию, поэтому поступление наносов в водоем, скорости осадконакопления и их изменения во времени контролируются в основном природными факторами. Установлено, что для двух озер среднегорной зоны и зоны с залуженными и залесенными водосборами, современные скорости накопления отложений составляют 0.05–0.07 см/год, из которых практически половину составляют органические остатки. Скорости осадконакопления в высокогорном оз. Донгуз-Орун имеют тенденцию к росту и составляют в последние 30 лет 0.32 см/год без учета значительного объема наносов, которые переоткладываются в дельте перед водоемом. Противоположенный тренд скоростей осадконакопления выявлен для высокогорного оз. Гарабаши, отличительной особенностью которого является отсутствие в настоящее время ледников на его водосборе и достаточно высокое продуктивное покрытие водосбора растительностью. Скорости осадконакопления в оз. Сухой Лиман, расположенном в низкогорной зоне, составляют 0.1 см/год с трендом небольшого роста, обусловленным некоторым увеличением антропогенного воздействия, связанном с локальными вырубками и ростом рекреационной нагрузки.

Ключевые слова: скорости осадконакопления, озера, радионуклидное датирование, темпы денудации, Кавказ

DOI: 10.31857/S2587556623010107, **EDN:** LJZPYG

ВВЕДЕНИЕ

Донные осадки водоемов — это важнейший природный архив, фиксирующий информацию об изменениях окружающей среды за период седиментации. В частности, знания о скоростях накопления и составе донных отложений озер позволяют судить об интенсивности процессов денудации на их водосборах. В качестве хрономаркеров для выявления скоростей осадконакопления за различные интервалы времени используются радионуклиды природного и техногенного происхождения. Неравновесный (атмосферный) $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ и ^{137}Cs давно применяется для оценки скоростей отложения наносов в водоемах (Corbett et al., 2007; Putyrskaya et al., 2020; Rose et al., 2011; Semertizidou et al., 2019; Su and Huh, 2002; Yamada

and Aono, 2003). В сочетании с использованием датировок донных отложений с применением ^{14}C возникает возможность проводить оценки темпов аккумуляции за более длительные временные интервалы (Carbon Isotope Techniques, 1991; Luque and Julià, 2002). В результате совместного использования перечисленных выше радиоизотопов можно определить тенденции изменений темпов денудации на водосборах исследуемых водоемов по десятилетиям (для 150-летнего периода) и столетиям (в зависимости от детальности отбора проб для радиоуглеродного анализа), и тем самым охватывать временные интервалы в несколько тысяч лет.

В горах достаточно отчетливо проявляется влияние высотной поясности, которая определяет проективное покрытие поверхности почвы, а

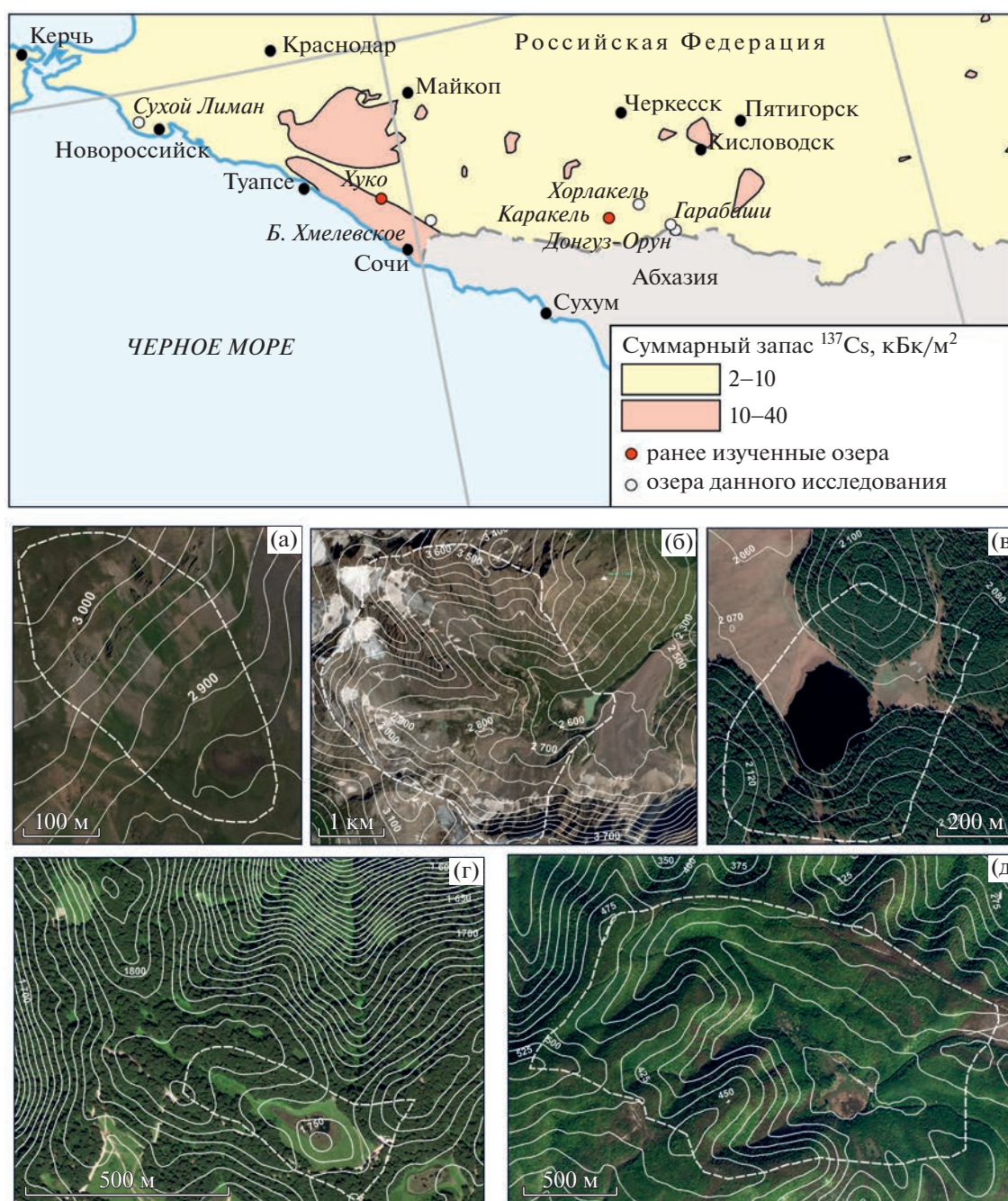


Рис. 1. Положение исследуемых озер на карте Чернобыльских выпадений 1998 г. (Izrael, n.d.), границы водосборов (показаны пунктиром) и конфигурация их водного зеркала: (а) Гарабиши, (б) Донгуз-Орун, (в) Хорлакель, (г) Б. Хмелевское, (д) Сухой Лиман.

также степень антропогенного воздействия на водосборы озер, что, в свою очередь, наряду с особенностями выпадения стокоформирующих осадков, определяет темпы осадконакопления и их изменения во времени (Hutchinson et al., 2016; Rose et al., 2011). Обычно для горных территорий изменения темпов осадконакопления в большей степени связаны с изменениями антропогенной нагрузки на их водосборы (Ahn, 2018; Ahn et al., 2009) — чем

выше нагрузка, тем интенсивнее происходит осадконакопление.

Ранее в пределах российской части Западного и Центрального Кавказа был изучен ряд кернов, отобранных в озерах Хуко (1744 м над ур. м.) и Каракель (1335 м над ур. м.). Скорость осадконакопления в этих водоемах за последние две тысячи лет была оценена в 0.03 и 0.034 см/год соответственно (Александрин и др., 2019; Grachev et al.,

Таблица 1. Основные характеристики исследованных озер Кавказского хребта

Название	Высота, м над ур. м.	Площадь водного зеркала, м ²	Средняя глубина, м	Происхождение котловины озера	Площадь водосбора, км ²	Средне- годовая сумма осадков, мм	¹³⁷ Cs*, сумм. загр., кБк/м ²	Удельный водосбор	Амплитуда высот внутри водосбора, м	Растительность водосборов
Гарабаши	2880	1200	1.5	Ледниковое	0.065	948	2–10	83.3	140	Альпийская, луговая с фрагментами субнивальных лишайниковых пустошей
Донгуз-Орун	2545	105000	10	Ледниковое	13.3	948	2–10	126	1200	Альпийская, луговая
Хорлакель	2040	437000	6	Ледниковое	0.63	1046	2–10	5.72	60	В верхней части хвойно- широколиственные леса, у озера – субальпийская, высокотравные луга на полянах у верхней гра- ницы леса
Б. Хмелевское	1752	9390	2	Тектоническое	0.96	1607	10–40	102	104	В верхней части широко- лиственные леса верхней границы леса, у озера – субальпийская, высоко- травные луга на лесных полянах верхнегорных лесов
Сухой Лиман	275	40000	1	Тектоническое	2.57	560	2–10	803	280	Широколиственные полидоминантные леса

Примечание. * Приведены данные на 1998 г. С тех пор площадная оценка выпадений ¹³⁷Cs в данном регионе не проводилась.

2021). В этом регионе помимо ^{137}Cs глобального происхождения отмечаются и выпадения Чернобыльского происхождения, местами существенно превышающие глобальные (Izrael, 1998). В итоге совместное использование ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ позволяет построить более точную модель осадконакопления в водоемах Западного и Центрального Кавказа. Регион исследования характеризуется высокой вариабельностью модуля стока взвешенных наносов: от 100–150 т/км²/год в предгорной зоне, расположенной к северу от Главного Кавказского хребта, до 600 т/км²/год в низкогорной зоне Черноморского побережья Кавказа (Golosov and Tsyplov, 2021). Большая часть исследованных озер находится в труднодоступных, слабо подверженных антропогенному влиянию районах. Кроме того, почти все, за исключением оз. Донгуз-Орун, исследованные озера имеют относительно небольшую площадь водосбора, и в этой связи темпы аккумуляции в них более резко реагируют на происходящие изменения на их водосборах.

Целью исследования является оценка скоростей осадконакопления в озерах и их изменений во времени для Центрального и Западного Кавказа, что позволяет судить о темпах денудации на их водосборах. Для этого были проанализированы керны донных отложений, отобранные из 5 озер, расположенных в разных высотных зонах.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследований выбрано 5 озер, расположенных в различных высотных зонах Западного и Центрального Кавказа. Два озера (Гарабаши и Донгуз-Орун) располагаются в высокогорной зоне, два озера (Хорлакель и Б. Хмелевское) находятся в среднегорье и одно озеро (Сухой Лиман) — в предгорно-низкогорной зоне на небольшом удалении от Черного моря. Основные параметры озер представлены в табл. 1, а их местоположение, конфигурация водосборов и самих озер показаны на рис. 1.

Озеро Донгуз-Орун (43°13'24" с.ш.; 42°29'41.26" в.д.) находится на Центральном Кавказе в Приэльбрусье. Оно образовано в результате подпруживания постоянного водотока боковой мореной ледника Донгуз-Орун. Озеро проточное, с двумя впадающими ручьями и вытекающей из него р. Донгуз-Орун. Наличие дельты, площадью 0.15 км², способствует перехвату значительной части наносов, поступающих с водосбора, и только наиболее тонкие фракции поступают в водоем. Согласно данным Каталога ледников СССР (1970), на водосборе озера находятся четыре ледника юго-восточной и северо-восточной экспозиций. Питание оз. Донгуз-Орун смешанное и включает: талые ледниковые воды; сток, формирующийся при таянии снежного покрова и выпа-

дении ливневых осадков. Собственная биопродуктивность озера минимальна из-за низких температур. Вклад органического вещества, смываемого со склонов, в общий объем донных отложений также незначителен. Можно интерпретировать накопленный в озере рыхлый осадок в качестве прямого продукта разрушения коренных пород водосбора ледниковой экзарацией и другими экзогенными процессам. Среднегодовая температура 2.6°C, средняя температура теплого периода — 11.4°C, средняя температура зимнего периода — 6.3°C. Среднегодовая сумма осадков 948 мм с максимумом в июле.

Озеро Гарабаши (43°16'29.29" с.ш.; 42°28'51.06" в.д.) расположено на правом борту долины руч. Гарабаши (приток р. Баксан), верховья которого располагаются на южном склоне горы Эльбрус. В бассейне водосбора озера сохранились морены, сформировавшиеся в период существования приклинкового ледника, в настоящее время уже несуществующего. Озеро имеет перелив — ручей сброса, функционирующий в период его активного питания. В настоящее время озеро регулярно пересыхает в конце лета, что приводит к растрескиванию и, возможно, частичному перемешиванию верхних сантиметров донных отложений. Поверхностный сток на склонах водосбора формируется при таянии снега в мае — начале июня и при выпадении ливней в период с июня по начало сентября. Поверхность склонов водосбора задернована. Мощность рыхлообломного чехла склоновых отложений составляет 10–15 см. Климатические характеристики в районе озера такие же, как и для оз. Донгуз-Орун, так как они располагаются на относительно небольшом удалении друг от друга и в пределах одного диапазона высот.

Озеро Хорлакель (43°29'35" с.ш.; 42°13'06" в.д.) расположено на северном склоне Передового хр. в междуречье рр. Худес и Хурзук на высоте 2040 м над ур. м. Межморенная озерная котловина площадью около 1 км² в центральной части погребена под пологим конусом выноса, разделяющим ее на две части. Современный водосбор озера в основном залесен, а на остальной части залужен, и характеризуется достаточно плотным дерновым покровом. Залуженная часть водосбора используется в качестве пастбища, но нагрузка на него невысокая. Суммарное количество осадков составляет 1046 мм/год, среднегодовая температура воздуха — 4.1°C.

Озеро Большое Хмелевское (43°43'04" с.ш.; 40°12'02.60" в.д.) расположено на вершинной поверхности восточного отрога хр. Ачишко. Оно имеет тектоническое происхождение и является наиболее крупным среди Хмелевских озер. Питается озеро в основном атмосферными осадками, в том числе талыми водами. В озеро не впадают и не вытекают постоянные водотоки. Хорошо выражен-

Таблица 2. Характеристика отобранных кернов из озер Западного и Центрального Кавказа и число проанализированных образцов на содержание радионуклидов (R) и ^{14}C

Название	Год отбора	Мощность исследованной части керна, см	Глубина водоема, с которой проводился отбор керна, м	R	^{14}C
Гарабаши	2018	103	0	16	1
Донгуз-Орун	2014	60	12	41	—
Хорлакель	2017	110	8	26	5
Большое Хмелевское	2012	19	2	19	—
Сухой Лиман	2021	21	0	21	—

ных в рельефе зон аккумуляции на водосборе озера не обнаружено. Около 50% водосбора — крутые склоны, окружающие озеро. Их нижние части заняты травянистыми сообществами, выше растёт густой лиственный лес. Водосбор озера является рекреационной зоной. Среднегодовая температура составляет 7.6°C . Среднегодовая сумма осадков — 1607 мм с максимумом в мае.

Озеро Сухой Лиман ($44^{\circ}45'16''$ с.ш.; $37^{\circ}27'22''$ в.д.) — это небольшой, бессточный водоем, расположенный в горной долине между горами Шахан и Кобыла на расстоянии около 5.5 км от пос. Малый Утриш. Котловина оз. Сухой Лиман сейсмогенного происхождения с плоским дном и относительно пологими склонами. Во время выпадения сильных ливней, паводки, формирующиеся во временных водотоках, приводят к увеличению зеркала озера до 4 га. В межень озеро может почти полностью пересыхать и выделяется в рельефе плоским бурым понижением, заросшим камышом. На водосборе озера преобладают леса (см. табл. 1). Рыхлые отложения имеют довольно мощный слабогумусированный (содержание гумуса в верхнем слое всего 3.6%) профиль с признаками оглеения (чередование сизых и ржавых пятен). Питание озера преимущественно дождевое. Среднегодовая сумма осадков — 560 мм. Среднегодовая температура воздуха 13°C .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб донных осадков на исследуемых озерах проводился в разные годы в период с 2012 по 2021 г. (табл. 2). Два озера (Гарабаши и Сухой Лиман) в момент отбора проб были высохшими, что позволило отбирать пробы в центральной части чаши водоемов. Бурение донных осадков на оз. Сухой Лиман проводилось с использованием бура Качинского (диаметр 3.5 см). Отбор донных наносов на оз. Гарабаши проводилось цилиндрическим отборником с внутренним диаметром 50 мм. Кроме того, рядом с местом отбора керна был выкопан шурф и сделано подробное описание отложений.

На остальных озерах проводилось эхолотирование с составлением карты глубин. Для отбора колонок донных отложений выбиралась наиболее глубокая часть водоема. При отборе керна донных отложений использовался модифицированный поршневой бур ударного типа (Nesje, 1992) с внутренним диаметром пробоотборника 110 мм. Пробоотбор проводился в теплое время года со специально подготовленной платформы, установленной на надувном катамаране.

Послойный отбор проб отложений (рис. 2) на фронтальной части дельты оз. Донгуз-Орун, общая площадь которой составляет 0.15 км^2 , выполнен с помощью пробоотборника с внутренним диаметром 3 см. Точки опробования находились на одинаковой высоте от уреза воды, кроме точки DOD-2, которая находилась на 5 м выше остальных. Нарезка проб на слои мощностью 3 см производилась непосредственно внутри пробоотборника. После этого, в полевых условиях, каждая из проб упаковывалась в отдельные пластиковые пакеты, а пробоотборник очищался с помощью влажных салфеток. Всего было отобрано и проанализировано на содержание радионуклидов 57 образцов. Для последующего проведения аналитических исследований на содержание радионуклидов, производился в лаборатории послойный отбор образцов из центральной части кернов площадью $2.7 \times 2.8\text{ см}$. Керна из озер Гарабаши и Донгуз-Орун были поделены на слои по 0.5 см. Керна из остальных озер нарезались на слои 1 см. Каждый из образцов просушивался при температуре 105°C в течение 8 ч, был перетерт и помещен в емкость с заданной геометрией для дальнейшего проведения гамма-спектрометрического анализа.

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%. Исследовалось содержание в образцах следующего набора радионуклидов естественного и техногенного происхождения: ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{210}Pb и

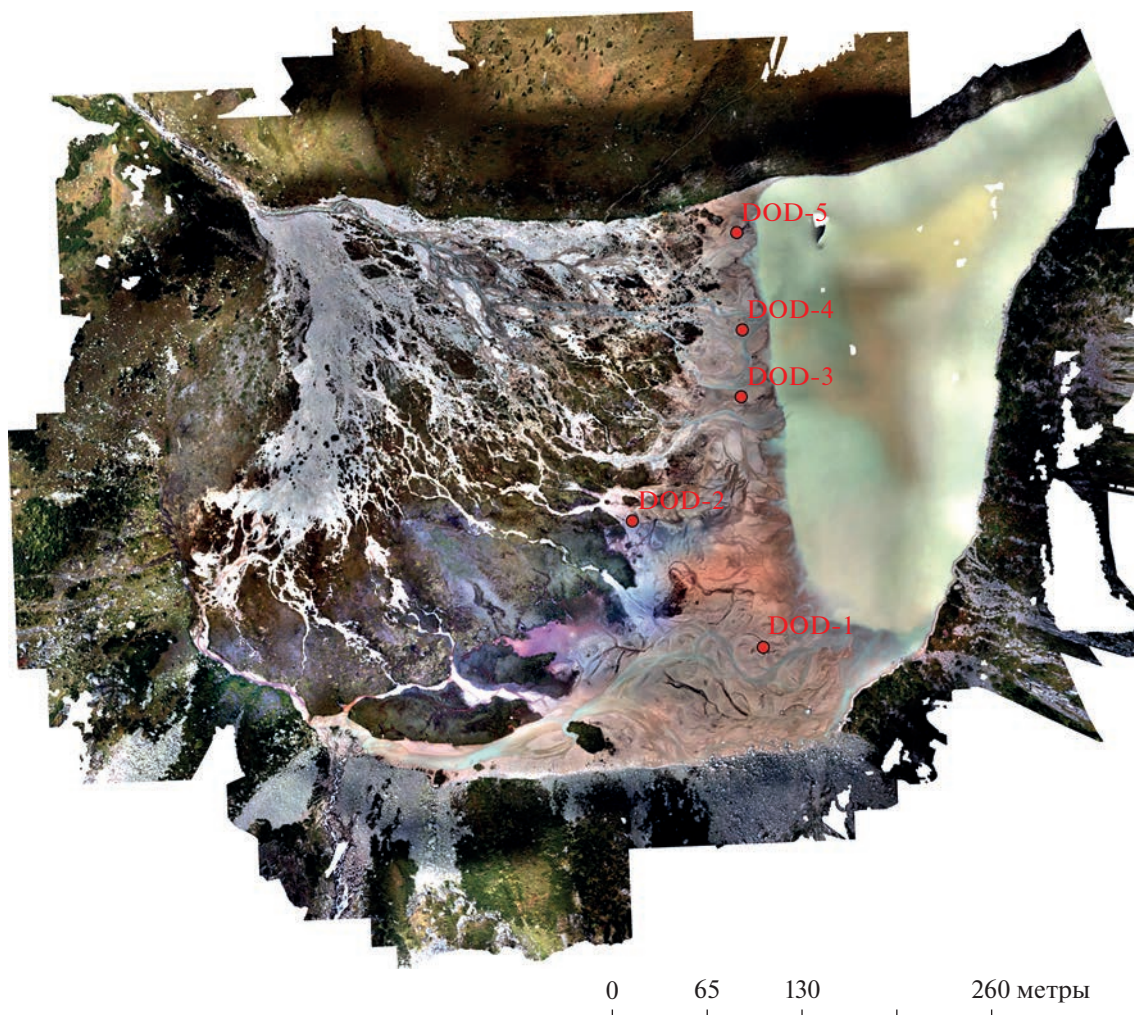


Рис. 2. Дельта оз. Донгуз-Орун и места отбора проб (DOD-1).

^{241}Am . Удельная активность ^{226}Ra оценивалась по двум линиям, одной принадлежащей самому радию (186 keV), и другой — его дочернему ^{214}Bi (609 keV). Массы образцов составили от 1.2 до 12 грамм. Время измерения было не менее 60000 с. Систематические неопределенности включали в себя: погрешность пробоотбора — 3%, погрешность пробоподготовки — 2%, погрешность средств измерения — 2% и в сумме не превышали 8%.

Для определения возраста донных отложений на основе содержания $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ использовалась модель постоянного потока (Abril, 2022; Corbett and Walsh, 2015):

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A(\infty)}{A(x)},$$

где: t — возраст осадка, лет; $A(\infty)$ — активность поверхностного горизонта, рассчитанная исходя из сглаженной функции распределения запасов по

глубине; Бк/м^2 , $A(x)$ — удельная активность горизонта; Бк/м^2 , λ — постоянная радиоактивного распада ^{210}Pb .

Для выполнения расчетов с помощью данной модели должно соблюдаться условие постоянства потока через раздел фаз вода–осадок. Поэтому модель справедливо применять для непересыхающих озер. Для озер Гарабаши и Сухой Лиман датировка проводилась только на основе анализа эпюры вертикального распределения ^{137}Cs в толще донных наносов.

Для определения возраста отдельных слоев донных отложений с помощью техногенного ^{137}Cs на эпюре его вертикального распределения были выделены пики, нижний из которых, при его наличии, соответствует максимуму глобальных выпадений в 1963 г. (основные испытания ядерного оружия в Северном полушарии), а верхний соответствует поверхности донных отложений в 1986 г. (авария на Чернобыльской АЭС) (Golosov et al., 2018).

Из кернов донных наносов озер Хорлакель и Гарабаши были отобраны образцы органического вещества для определения возраста радиоуглеродным методом. Датирование осадка радиоуглеродным методом было проведено с помощью ускорительной масс-спектрометрии (AMS) в Университете Джорджии (США), пробоподготовка и графитизация осуществлялась в Лаборатории радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии Института географии РАН. Для построения возрастной модели была использована калибровочная кривая IntCal13 (Reimer et al., 2013).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Важным отличием оз. Донгуз-Орун от остальных исследованных озер является относительно большая площадь водосбора с наличием двух постоянных водотоков, питающихся от ледников и наличие крупной дельты, перехватывающей значительную часть, транспортируемых водотоками наносов. В итоге на современных скоростях накопления в озере не сказывается периодическое формирование экстремальных паводков, так как основной объем наносов, транспортируемых ими, перекладывается в дельте. КERN, отобранный в оз. Донгуз-Орун, представлен бежево-коричневым пылеватым суглинком с редкими линзами песка и имеет ярко выраженную слоистость. Слоистость регулярная по всей длине керна со средней мощностью отдельных слоев около 1.5 мм. В оз. Донгуз-Орун скорость аккумуляции наносов была определена ранее на основе анализа эпюр вертикального распределения ^{137}Cs . Было выявлено ее постепенное нарастание от в среднем 0.2 см/год в период 1963–1986 и до 0.32 см/год в период с 1986 по 2014 г. (Kuzmenkova et al., 2020). Во внутрипрофильном распределении ^{137}Cs четко выделяются 2 пика: глобальных (1.2 кБк/м^2) и чернобыльских (2.8 кБк/м^2) выпадений, которые совпадают с расчетом осадконакопления на основе модели постоянного потока (рис. 3).

Результаты исследования содержания ^{137}Cs в отложениях фронтальной части дельты указывают на неравномерное поступление наносов по ее площади (рис. 4). В поверхностном горизонте (0–10 см) обнаружено примерно одинаковые запасы ^{137}Cs ($0.09\text{--}0.21 \text{ кБк/м}^2$). В южной и центральной частях дельты аккумуляция наносов идет постоянно, и можно предположить, что за пост-Чернобыльский период темпы аккумуляции здесь превышают 1 см/год. Поступление наносов в северную часть дельты происходит менее регулярно и с перерывами. Выделяются четкие пики ^{137}Cs в точках 4 и 5, которые можно связать с Чернобыльскими выпадениями. В этом случае скорости отложения наносов здесь составляют — 0.5 см/год

(точка 4) и 1 см/год (точка 5). Высокие запасы $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (свыше 3 кБк/м^2) в отдельных горизонтах указывают на перерывы в осадконакоплении. Пробы в дельте отбирались в ее фронтальной части, так как здесь состав отложений, преимущественно, суглинистый. По мере удаления от озера постоянно нарастает доля грубообломочного материала. Таким образом, дельта перехватывает значительный объем наносов.

Вертикальное распределение ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ в донных отложениях оз. Гарабаши однозначно указывает на практически полное отсутствие поступления наносов с площади водосбора за последние как минимум 60–70 лет (рис. 5). Верхняя часть отложений оз. Гарабаши 0–21 см представляет собой серые средние суглинистые однородные плотные отложения, предположительно турбидит. Отсутствие какой-либо слоистости в верхнем 20-см слое донных отложений и его достаточно однородный состав позволяет предположить, что данная толща сформирована за счет смещения переувлажненного и разжиженного грунта. Таким образом, весь временной интервал, когда поверхность водосбора озера была задерживалась, характеризуется очень низким поверхностным смывом. Момент стекания переувлажненного рыхлого грунта, сформировавшего верхнюю 20 см пачку донных отложений, определить достаточно сложно, но более вероятно, что это произошло еще до формирования устойчивого травянистого покрова на водосборе.

Начиная с глубины 21 см и до 64.5 см донные отложения озера имеют слоистый характер, различную дисперсность и окраску. Данная толща формировалась за счет ручейкового и плоскостного смыва на склоновом водосборе озера в период с момента начала активного таяния ледника, конечная морена которого и привела к формированию плотины водоема. Продукты смыва постепенно оттаивались в водоеме, что в связи с их разной крупностью привело к образованию охристых прослоев и ленточных глин с регулярным чередованием. На глубине 64.5–75 см имеется горизонт оторфованного песка, радиоуглеродный возраст которого составляет $1505 \pm 20 \text{ BP}$ ($\text{IGAN}_{\text{AMS}} 6847$). Таким образом, суммарная аккумуляция за последние 15 столетий составила порядка 70–75 см, или 0.05 см/год. Можно предположить, что темпы аккумуляции постепенно затухали по мере таяния ледника и последовавшего за этим освоения склонов травянистой растительностью. На глубине 75–103 см супеси перемешаны с щебнем и линзами крупного песка, ниже которых расположен крупный валунно-щебнистый горизонт. Вероятно, что этот материал был доставлен при фронтальном движении склонового ледника. Он был промыт в период начала активного таяния лед-

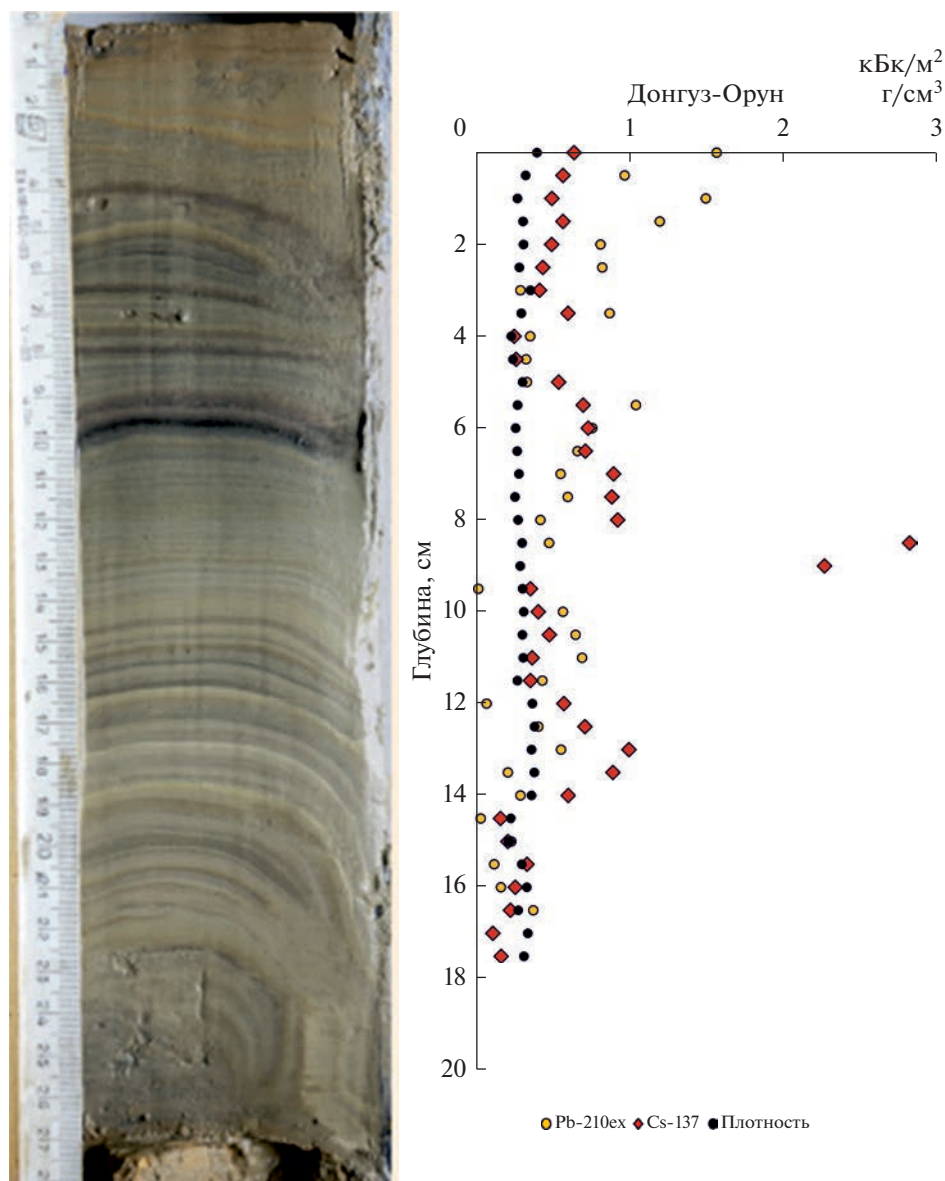


Рис. 3. Вертикальное распределение ^{137}Cs (кБк/м²), $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (кБк/м²) и плотность осадков (г/см³) оз. Донгуз-Орун (фото керна).

ника, при котором часть воды вытекала из формирующегося водоема при его переполнении.

Суммарные запасы ^{137}Cs в донных отложениях озера составляют 1.37 кБк/м², что соответствует его среднему содержанию в глобальных выпадениях на территориях, не подвергшихся влиянию Чернобыльской АЭС (Израэль, 2009). Это также является косвенным подтверждением того, что за последние 60–70 лет поступление наносов с водосбора было ничтожно малым.

Донные отложения озер Большое Хмелевское и Хорлакель представлены темно-серым сапропелем со значительной долей слаборазложившихся растительных остатков. Более чем метро-

вый слой донных отложений оз. Хорлакель представляет собой сапропель, насыщенный влагой (95%) с небольшим количеством минерального вещества и очень низкой плотностью. Результаты радиоуглеродного датирования и вертикальные распределения ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ по глубине свидетельствуют о том, что из-за очень низкой плотности верхний слой донных отложений был утерян при отборе (рис. 6). Учитывая очень низкую плотность отложений всей толщи, составившей порядка 0.12 г/см³ (см. рис. 6), можно утверждать, что как минимум за последние 1800 лет с водосбора в озеро поступало ничтожно малое количество наносов. При этом относительная равномерность

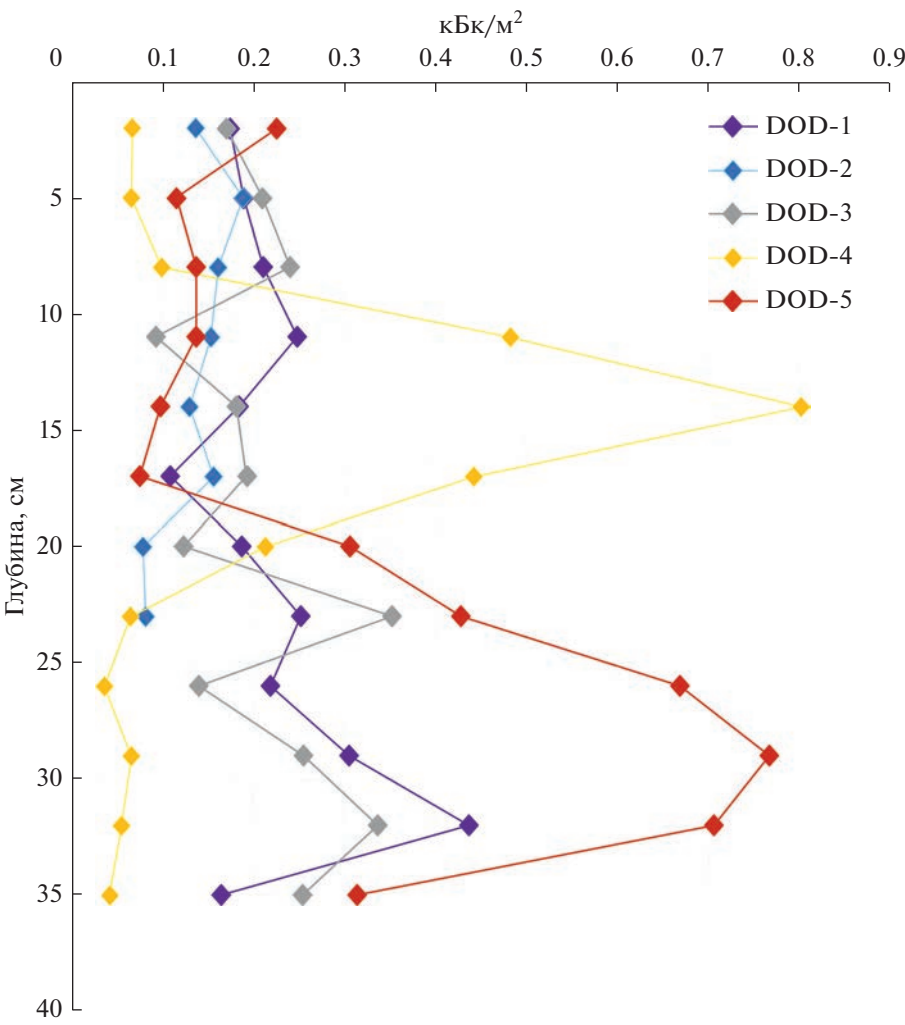


Рис. 4. Вертикальное распределение ¹³⁷Cs (кБк/м²) в пойменных отложениях оз. Донгуз-Орун.

накопления сапропеля в озере за этот временной интервал, судя по датировкам (табл. 3), позволяет предположить, что даже температурный режим озера сохранялся неизменным, что косвенно свидетельствует об относительно неизменных условиях формирования стока на водосборе. КERN представляет собой слабо уплотненные органические остатки разной степени разложенности, поэтому мы видим результат активной вертикальной миграции радионуклидов, а осадконакопление обусловлено в основном накоплением органического вещества озерного происхождения.

В случае с оз. Большое Хмелевское, проанализированная верхняя пачка донных наносов также представлена слабо уплотненным сапропелем. Но в данном случае при отборе керна не было потерь донных отложений. Максимумы ¹³⁷Cs и ²¹⁰Pb_{ex} расположены в поверхностном слое, что указывает на крайне низкие темпы накопления органического вещества в последние 30 лет. Пик

¹³⁷Cs на глубине 3.5–4.5 см можно интерпретировать как максимум глобальных выпадений. Это предположение косвенно подтверждается характером эпюры вертикального распределения ²¹⁰Pb_{ex} (рис. 7). В любом случае скорости накопле-

Таблица 3. Результаты радиоуглеродного датирования донных отложений озера Гарабаши и Хорлакель

Ключевой объект	Материал	Горизонт	¹⁴ C, ВР (1σ)
Гарабаши	Оторфованный песок	64.5–75	1505 ± 20
Хорлакель	Сапропель	1–2 см	560 ± 30
Хорлакель	Сапропель	30–31	560 ± 30
Хорлакель	Сапропель	60–61	1160 ± 30
Хорлакель	Сапропель	90–91	1510 ± 30
Хорлакель	Сапропель	117–118	1890 ± 20

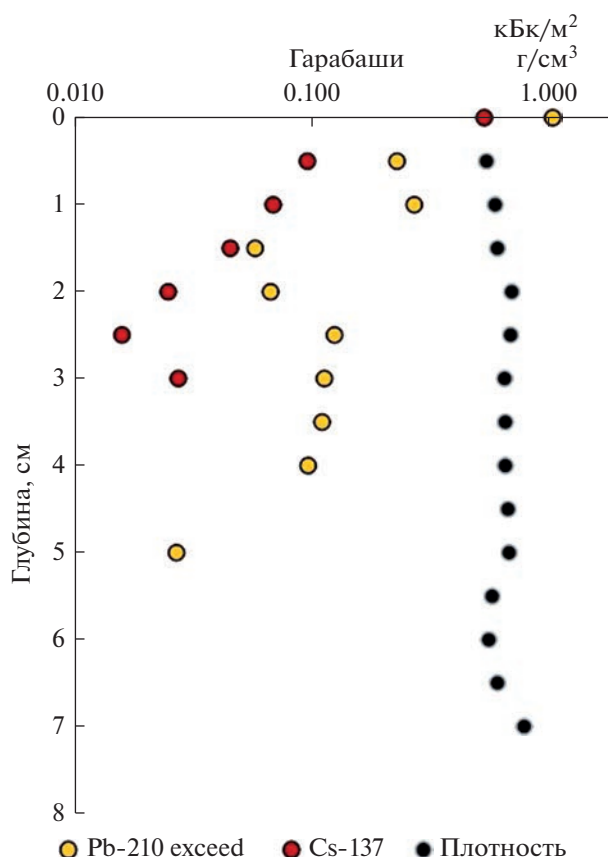


Рис. 5. Вертикальное распределение ^{137}Cs (кБк/м²), $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (кБк/м²) и плотность осадков (г/см³) оз. Гарабаши (фото верхних 12 см керна).

ния органического вещества на оз. Большое Хмелевское даже ниже, чем на оз. Хорлакель, что вероятно обусловлено меньшей освещенностью данного водоема, который располагается в узкой котловине, а поступление минерального вещества с площади его водосбора ничтожно мало. Результаты расчета скорости роста осадка на основе вертикального распределения $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ с помощью модели постоянного потока определили ее на уровне 0.05–0.07 см/год за последние 120 лет.

Для оз. Сухой Лиман эпоры вертикального распределения ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ показывают, что наносы поступали в озеро относительно равномерно в последнее столетие (рис. 8). По своему механическому составу донные отложения представлены суглинком, с увеличением от легкого к тяжелому сверху вниз по толще, однородного коричневого цвета, встречаются песчаные включения, а также корни растений. С учетом очень низких запасов ^{137}Cs мы предполагаем, что весь обнаруженный цезий — результат глобальных

выпаждений. Таким образом, при учете достоверной фиксации $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ до глубины 20 см можно предположить, что для данного керна мы можем оценить скорость осадконакопления за период 120–150 лет в 0.1–0.16 см/год.

ОБСУЖДЕНИЕ

Выявленные скорости аккумуляции наносов и органического вещества отражают особенности развития процессов денудации на склонах водосборов и тепловой режим водоемов в части развития в нем водной растительности. Для бассейна оз. Донгуз-Орун влияние повышенного стока воды и наносов за счет наличия двух постоянных водотоков и больших размеров водосбора по сравнению с другими озерами (см. табл. 1) сглаживается присутствием обширной дельты, в которой происходит рассредоточение стока и перетолжение всех донных и значительной части взвешенных наносов, выносимых с водосборов двух ручьев. Скорости аккумуляции в оз. Донгуз-

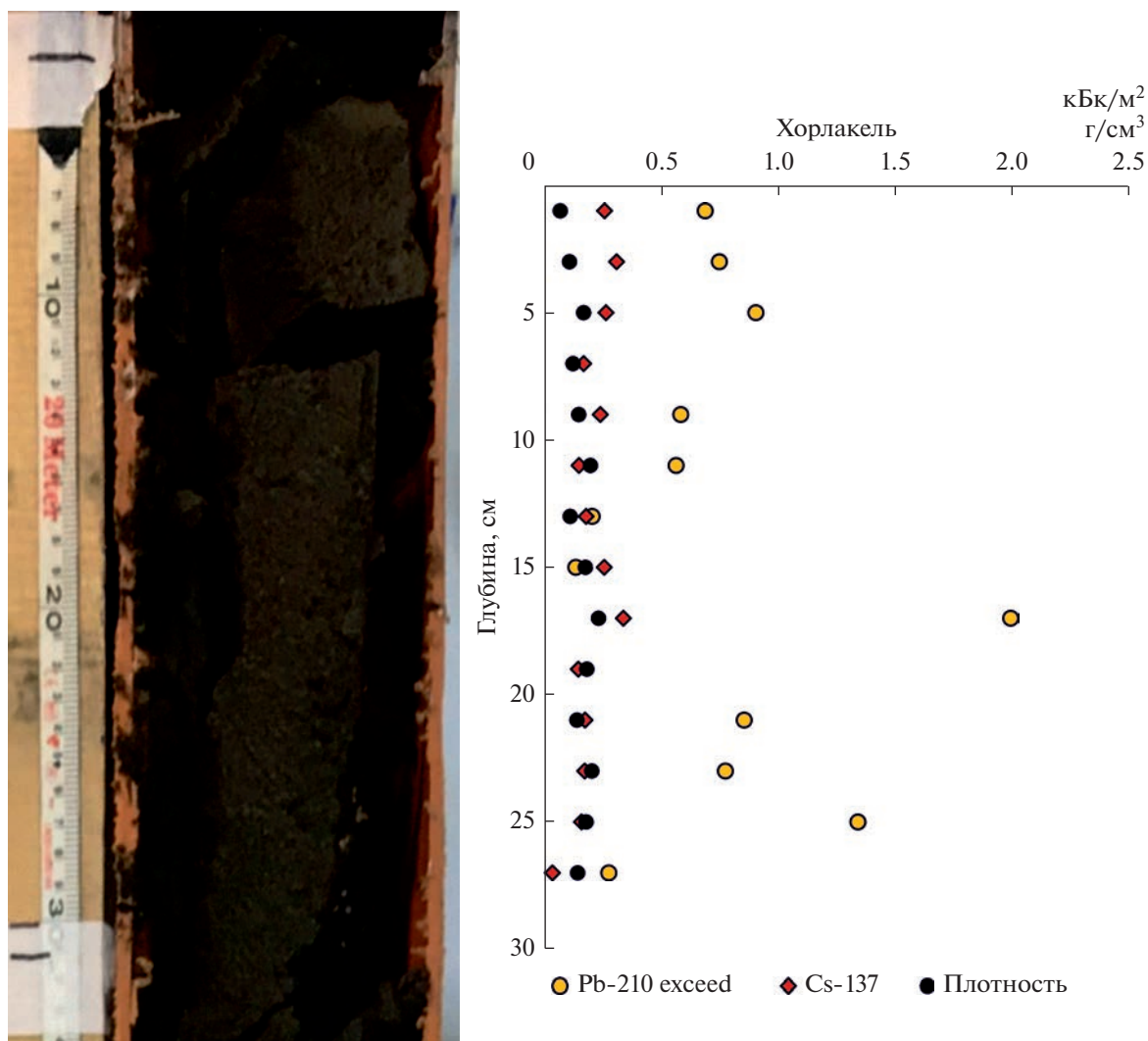


Рис. 6. Вертикальное распределение ^{137}Cs (kBq/m²), $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (kBq/m²) и плотность горизонтов (г/см³) в донных отложениях озера Хорлакель (фото керна).

Орун выросли практически в полтора раза за период с 1986 г., но вероятнее всего основной прирост произошел со второй половины 1990-х, так как именно в этот период резко ускорилось таяние ледников Эльбруса после периода относительного замедления таяния, который продолжался с начала 1970-х (Михаленко, 2020). Этот тренд характерен и для приледниковых озер в других частях европейского континента (Xu et al., 2015). Однако установленные темпы аккумуляции в оз. Донгуз-Орун практически на порядок ниже, чем на большинстве озер такого типа. Это связано с тем, что основной объем наносов, формирующихся на водосборе озера, перекладывается в пределах дельты. Площадь дельты в 2.5 раза превышает площадь зеркала озера, и при этом скорости аккумуляции даже во фронтальной части дельты как минимум в 2–3 раза выше, чем в самом озере (рис. 3–4). Из-за преобладания грубообломочного материала на большей части

дельты невозможно достоверно датировать отложения. Но, как минимум, исходя из особенностей формирования дельт, они не ниже, чем в ее фронтальной части. С учетом аккумуляции наносов в дельте современные темпы денудации в пределах водосбора оз. Донгуз-Орун можно оценить в 1.2–1.5 мм/год, что сопоставимо с темпами современной денудации высокогорной зоны Альп (Hinderer et al., 2013; Otto et al., 2009; Schlunegger and Hinderer, 2003). Оценки современных темпов денудации на водосборе оз. Донгуз-Орун также сопоставимы с темпами денудации водосбора р. Джанкуат, полученными на основе измерений расходов воды и наносов (Golosov and Tsyplenkov, 2021). Данный приледниковый водосбор располагается в Центральном Кавказе на удалении в несколько десятков километров от оз. Донгуз-Орун.

Скорости аккумуляции на водосборе оз. Гарабаши отражают этапы изменения денудации типичного высокогорного склона с момента начала

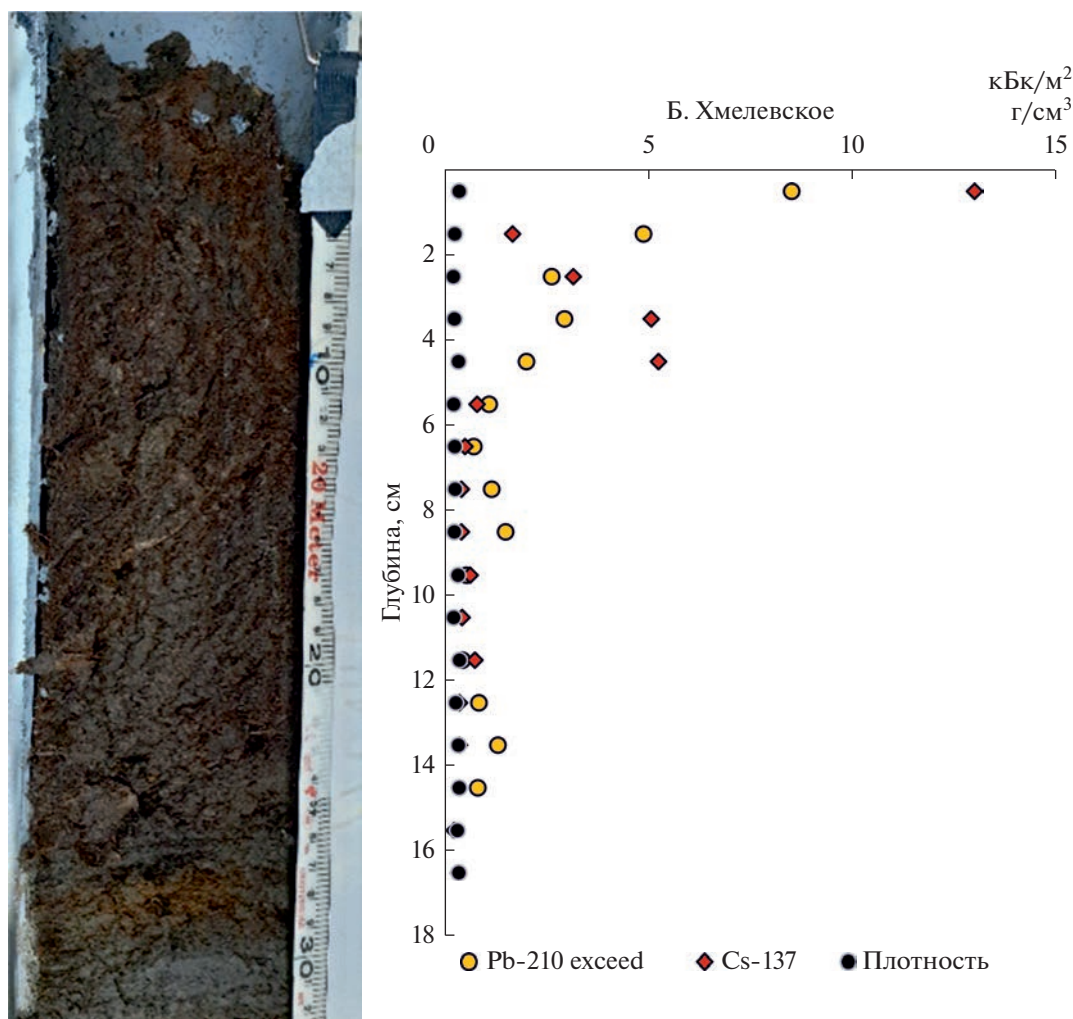


Рис. 7. Вертикальное распределение ^{137}Cs (кБк/м²), $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (кБк/м²), плотность осадков (г/см³) оз. Большое Хмелевское (фото керна).

таяния ледника, фронтальная морена которого послужила плотиной образовавшегося в период отступления ледника водоема. Учитывая небольшие размеры склонового водосбора водоема (см. табл. 1, рис. 1а) в период между его образованием и началом формирования дернового покрова на водосборе после того, как ледник полностью растаял, коэффициент доставки наносов в водоем был порядка 0.8–0.9, что характерно для небольших водосборов водоемов прогляциальной зоны (Carrivick and Tweed, 2013; Xu et al., 2015). Учитывая, что в целом площадь ледников Центрального Кавказа за период с конца XIX в. к настоящему времени сократилась практически наполовину (Котляков и др., 2015), а также ничтожно малое поступление наносов в оз. Гарабаши в последние как минимум 70 лет, максимально период с отсутствием проективного покрытия травянистой растительностью на водосборе можно оценить в 1350 лет. Следует также учитывать, что на освое-

ние травянистой растительностью освободившихся от ледника частей водосбора в зависимости от температурного режима уходит от 50 до 200 лет (Klaar et al., 2015). В итоге минимальные темпы денудации на водосборе оз. Гарабаши за период от начала активного таяния ледника и до формирования травянистого покрова составляют 0.01 мм/год. Однако очевидно, что часть наносов, поступавших со склонов в водоем вместе со стоком при экстремальных событиях, в связи с переполнением водоема могли транспортироваться в р. Гарабаши. Но в любом случае скорости осадконакопления в период до образования травянистого покрова на водосборе оз. Гарабаши сопоставимы со скоростями аккумуляции в приледниковых озерах (Hasholt et al., 2000). После формирования устойчивого травянистого покрова на водосборе темпы денудации сократились как минимум на порядок.

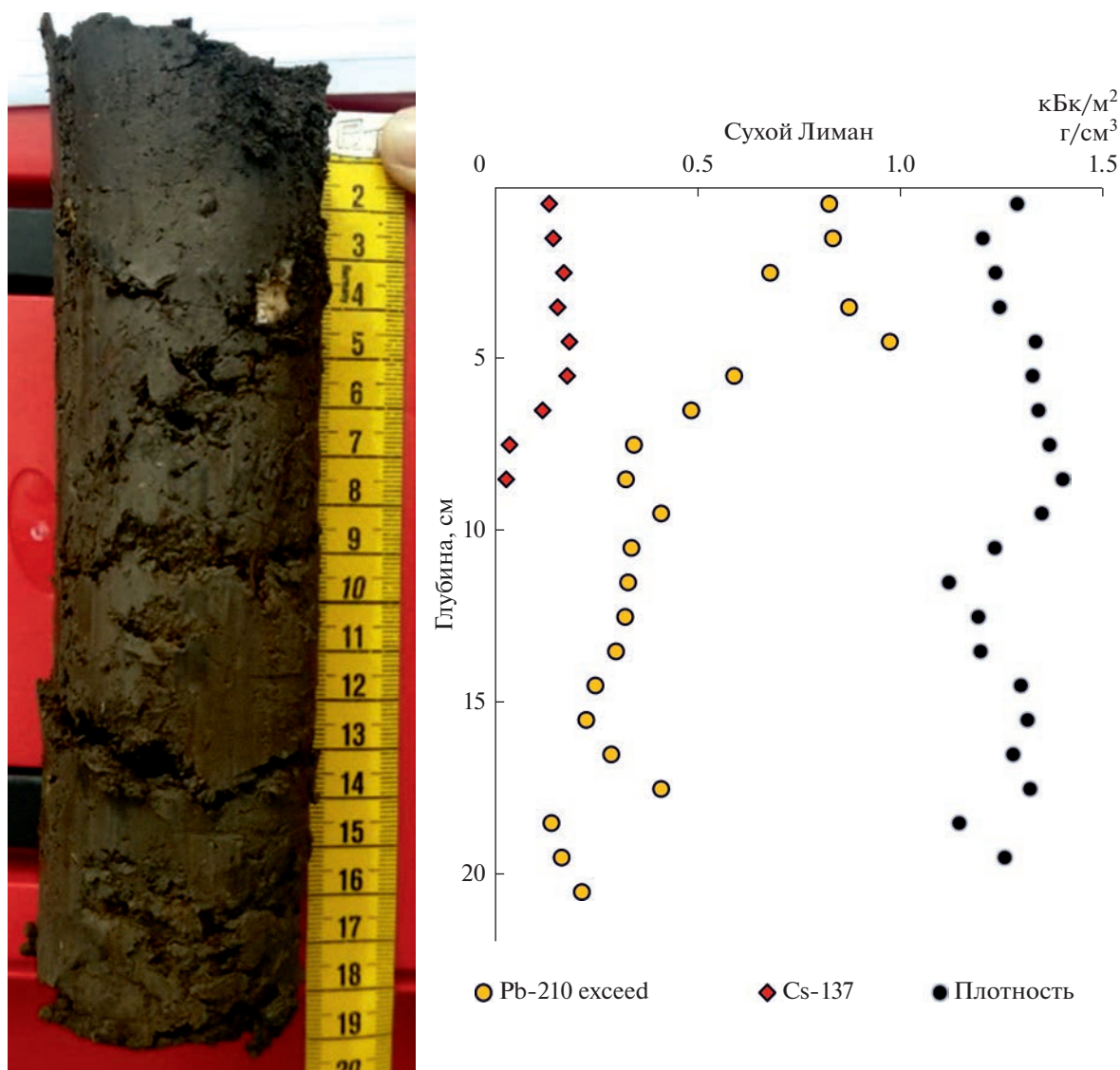


Рис. 8. Вертикальное распределение ^{137}Cs (кБк/м^2), $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (кБк/м^2) и плотность осадков (г/см^3) оз. Сухой Лиман (фото керна).

Скорости аккумуляции наносов в озерах Хорлакель и Хмелевское очень невысокие и сопоставимы со скоростями аккумуляции в озерах аналогичных размеров и типа в Британской Колумбии (Owens and Slaymaker, 1992) и Европе (Rose et al., 2011). Однако, в отличие от большинства небольших горных озер Европы, где наблюдается отчетливый тренд прироста темпов аккумуляции донных отложений в последние столетия, исследованные горные озера Кавказа характеризуются стабильно низкими в течение последних 2–3 тысячелетий скоростями осадконакопления в основном за счет органического вещества. Небольшой рост темпов осадконакопления в оз. Б. Хмелевское с середины 1960-х годов с 0.002 мм/год в предшествующие 50 лет до 0.004 мм/год в период общего потепления климата можно связать с не-

которым увеличением накопления органического вещества, а также за счет вовлечения этой территории в рекреационное использование. Несомненно, низким темпам денудации (<0.0001 мм/год) помимо высокого проективного покрытия склонов травянистой растительностью, способствуют небольшие размеры водосборов (см. табл. 1) и отсутствие линейных эрозионных форм в их пределах, где бы мог концентрироваться сток. Ранее было показано, что скорости аккумуляции в малых горных озерах растут по мере роста площади водосбора (Owens and Slaymaker, 1992).

Скорости осадконакопления в оз. Сухой Лиман, расположенном в низкоротной части Западного Кавказа, умеренные (0.1–0.16 см/год) по сравнению с озерами среднегорной зоны. Это

обусловлено двумя факторами, а именно: а) высокой неравномерностью выпадения осадков при их довольно небольшим по сравнению с водосборами других озер слое (см. табл. 1); б) наличием антропогенной нагрузки на водосбор. С 1955 по 1978 г. в непосредственной близости от оз. Сухой Лиман был размещен лесопункт, в радиусе 2 км активно велась рубка леса. Оба этих фактора способствуют нарушению проективного покрытия склонов водосбора травянистой растительностью. Кроме того, для данного региона, находящегося на небольшом удалении от Черного моря, характерно выпадение экстремальных осадков. Это приводит к периодическому формированию интенсивного поверхностного стока и смыва. Однако, учитывая размеры водосбора, средний слой денудации за 70-летний период оценивается всего в 0.0003 мм/год, что существенно ниже, чем наблюдается в горных прибрежных территориях с аналогичным сухим средиземноморским климатом (García-Ruiz et al., 2013). Основная причина подобных различий кроется в меньшей антропогенной нарушенности водосбора оз. Сухой Лиман по сравнению водосборами озер сухих субтропиков Средиземноморья, и, вероятно, связана с переотложением значительной части наносов, вовлеченных в смыв на локально нарушенных участках по пути их транспортировки в водоем. Также, большое значение имеют морфологические особенности водосбора, связанные с положением озера в рельефе. В котловину Сухого Лимана открывается целая серия сухих долин с крутыми бортами.

ВЫВОДЫ

Динамика осадконакопления и некоторые ее особенности в позднем голоцене определены для 5 озер Западного и Центрального Кавказа. Закономерно наибольшие скорости осадконакопления (0.2–0.32 см/год) с отчетливым трендом роста в 1.5 раза в период с 1986–2014 гг. по сравнению с периодом 1963–1986 гг. выявлены для высокогорного оз. Донгуз-Орун, имеющего наибольший по площади водосбор среди исследованных озер и преимущественно ледниковое питание. Водосборы остальных исследованных озер небольшие по размеру. Скорости осадконакопления в них, по сути, отражают современные темпы денудации на склонах их водосборов. Общей закономерностью для водосборов всех озер, несмотря на их расположение в большом диапазоне высот (275–2880 м), является относительно высокое проективное покрытие поверхности склонов травянистой растительностью, предохраняющей почву от размыва, и низкая антропогенная нагрузка. Темпы современной денудации водосборов озер оцениваются в интервале от 0.0001–0.0003 мм/год. Наиболее высокие темпы (0.0004 мм/год) уста-

новлены для водосбора низкогорного оз. Сухой Лиман, в пределах которого имеются участки локальных антропогенных нарушений (вырубка леса). Для водосборов озер среднегорной зоны (Хорлакель и Б. Хмелевское) выявлены минимальные темпы денудации, в целом, равномерные за период как минимум в течении последних 1800 лет. Водосбор высокогорного оз. Гарабаши расположен в приледниковой зоне и, судя по датировкам, примерно 1600 лет назад был занят склоновым ледником, фронтальная морена которого и является в настоящее время плотиной сезонно пересыхающего озера. В период таяния небольшого склонового ледника, продолжавшегося порядка 1200–1300 лет, и до момента освоения водосбора травянистой растительностью темпы денудации составляли как минимум 0.01 мм/год, тогда как в настоящее время они соответствуют темпам, рассчитанным для водосборов озер среднегорной зоны. Установленные скорости осадконакопления в озерах и полученные по ним оценки темпов денудации на их водосборах в целом соответствуют опубликованным данным по скоростям осадконакопления в озерах аналогичного типа, расположенных в Альпах и других горных странах. Некоторым исключением является оз. Сухой Лиман, находящееся в прибрежной низкогорной зоне. На водосборе данного озера темпы денудации существенно ниже, чем на водосборах аналогичных озер Средиземноморья, что объясняется гораздо меньшим антропогенным воздействием по сравнению с территориями низкогорий средиземноморского пояса.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Раздел данной работы по методам подготовлен в рамках госзадания № 0148-2019-0005 (AAAA-A19-119021990091-4). Работа над остальным текстом велась при финансовой поддержке РФФ, проект № 19-17-00181 “Количественная оценка бассейновой составляющей стока наносов и ее изменений в голоцене на реках Кавказа”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность член.-корр. РАН О.Н. Соломиной, к. г. н. П.А. Торопову, к. г. н. И.А. Корневой, а также к.г.н. М.М. Иванову за консультации во время работы над текстом.

FUNDING

The section of this work on methods was prepared within the state order no. 0148-2019-0005 (AAAA-A19-119021990091-4). Work on the rest of the text was carried out with the support of the Russian Science Foundation, project no. 19-17-00181p “Quantitative assessment of the

basin component of sediment runoff and its changes in the Holocene of the Caucasus rivers.”

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to O.N. Solomina, P.A. Toropov, I. Korneva, and M. Ivanov for consultations while working on the text.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрин М.Ю., Дарьин А.В., Грачев А.М., Соломина О.Н. Динамика региональных климатических условий за последние 2000 лет по данным литолого-геохимических исследований донных осадков озера Каракель (Западный Кавказ) // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 1. С. 73–85.
https://doi.org/10.31857/S2587-55662019173-85
- Израэль Ю.А. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси / под ред. Ю.А. Израэля, И.М. Богдевича. Минск: Белкартография, 2009. 140 с.
- Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Попова В.В., Чернова Л.П., Муравьев А.А., Ротомеева О.В., Никитин С.А., Зверкова Н.М. Современные изменения ледников горных районов России. М.: КМК, 2015. 288 с.
- Михаленко В.Н. Ледники и климат Эльбруса. М.—СПб.: Нестор-История, 2020. 372 с.
- Abril J.M. On the use of ^{210}Pb -based records of sedimentation rates and activity concentrations for tracking past environmental changes // J. Environ. Radioact. 2022. Vol. 244–245. 106823.
https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106823
- Ahn Y.S. Recent Changes in Sedimentation Rate in Three Lakes of Ishikari Wetland, Northern Japan Determined by ^{210}Pb Dating // Wat. Res. 2018. Vol. 45. P. 795–802.
https://doi.org/10.1134/S009780781805024X
- Ahn Y.S., Nakamura F., Kizuka T., Nakamura Y. Elevated sedimentation in lake records linked to agricultural activities in the Ishikari River floodplain, northern Japan // Earth Surf. Process. Landf. 2009. Vol. 34. P. 1650–1660.
https://doi.org/10.1002/esp.1854
- Appleby P.G., Oldfield F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment // CATENA. 1978. Vol. 5. P. 1–8.
https://doi.org/10.1016/S0341-8162(78)80002-2
- Carrivick J.L., Tweed F.S. Proglacial lakes: character, behaviour and geological importance // Quat. Sci. Rev. 2013. Vol. 78. P. 34–52.
https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.028
- Corbett D.R., Vance D., Letrick E., Mallinson D., Culver S. Decadal-scale sediment dynamics and environmental change in the Albemarle Estuarine System, North Carolina // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2007. Vol. 71. № 3–4. P. 717–729.
https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.09.024
- Corbett D.R., Walsh J.P. ^{210}Pb and ^{137}Cs : establishing a chronology for the last century / I. Shennan, A.J. Long, B.P. Horton (Eds.). Handbook of Sea-Level Research. UK, Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 2015. P. 361–372.
https://doi.org/10.1002/9781118452547.ch24
- Doering C., Akber R., Heijnis H. Vertical distributions of ^{210}Pb excess, ^7Be and ^{137}Cs in selected grass covered soils in Southeast Queensland, Australia // J. Environ. Radioact. 2006. Vol. 87. P. 135–147.
https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.11.005
- Gao J., Long Y., Zhang X., Collins A.L., He X., Zhang Y., Shi Z. Interpreting sedimentation dynamics at Longxi catchment in the Three Gorges Area, China, using Cs-137 activity, particle size and rainfall erosivity // J. Mt. Sci. 2016. Vol. 13. P. 857–869.
https://doi.org/10.1007/s11629-015-3637-0
- García-Ruiz J.M., Nadal-Romero E., Lana-Renault N., Beguería S. Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges // Geomorphol. 2013. Vol. 198. P. 20–36.
https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.023
- Golosov V., Tsyplenkov A. Factors Controlling Contemporary Suspended Sediment Yield in the Caucasus Region // Water. 2021. Vol. 13 (22). 3173.
https://doi.org/10.3390/w13223173
- Grachev A.M., Novenko E.Y., Grabenko E.A., Alexandrin M.Y., Zazovskaya E.P., Konstantinov E.A., Shishkov V.A., Lazukova L.I., Chepurayeva A.A., Kuderina T.M., Ivanov M.M., Kuzmenkova N.V., Darin A.V., Solomina O.N. The Holocene paleoenvironmental history of Western Caucasus (Russia) reconstructed by multi-proxy analysis of the continuous sediment sequence from Lake Khuko // Holocene. 2021. Vol. 31. P. 368–379.
https://doi.org/10.1177/0959683620972782
- Hasholt B., Walling D.E., Owens P.N. Sedimentation in arctic proglacial lakes: Mittivakkat Glacier, south-east Greenland // Hydrol. Process. 2000. Vol. 14. P. 679–699.
https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(200003)14:4<679::AID-HYP966>3.0.CO;2-E
- Hinderer M., Kastowski M., Kamelger A., Bartolini C., Schlunegger F. River loads and modern denudation of the Alps – A review // Earth-Sci. Rev. 2013. Vol. 118. P. 11–44.
https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.01.001
- Hutchinson S.M., Akinyemi F.O., Mindrescu M., Begy R., Feurdean A. Recent sediment accumulation rates in contrasting lakes in the Carpathians (Romania): impacts of shifts in socio-economic regime // Reg. Environ. Change. 2016. Vol. 16. P. 501–513.
https://doi.org/10.1007/s10113-015-0764-7
- Izrael Y.A. The atlas of caesium-137 contamination of Europe after the Chernobyl accident / A. Karaoglou, G. Desmet, G.N. Kelly, H.G. Menzel (Eds.). The radiological consequences of the Chernobyl accident. Brussels: European Commission, EUR 16544 EN., 1996. P. 1–10.
- Klaar M.J., Kidd C., Malone E., Bartlett R., Pinay G., Chapin F.S., Milner A. Vegetation succession in deglaciated landscapes: implications for sediment and landscape stability // Earth Surf. Process. Landf. 2015. Vol. 40. P. 1088–1100.
https://doi.org/10.1002/esp.3691
- Kuzmenkova N.V., Ivanov M.M., Alexandrin M.Y., Grachev A.M., Rozhkova A.K., Zhizhin K.D.,

- Grabenko E.A., Golosov V.N. Use of natural and artificial radionuclides to determine the sedimentation rates in two North Caucasus lakes // *Environ. Pollut.* 2020. Vol. 262. 114269.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114269>
- Luque J.A., Julià R. Lake sediment response to land-use and climate change during the last 1000 years in the oligotrophic Lake Sanabria (northwest of Iberian Peninsula) // *Sediment. Geol.*, 2002. Vol. 148. P. 343–355.
[https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00225-1](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00225-1)
- Nesje A. A Piston Corer for Lacustrine and Marine Sediments // *Arct. Alp. Res.* 1992. Vol. 24. P. 257–259.
<https://doi.org/10.1080/00040851.1992.12002956>
- Otto J.-C., Schrott L., Jaboyedoff M., Dikau R. Quantifying sediment storage in a high alpine valley (Turtmanntal, Switzerland) // *Earth Surf. Process. Landf.* 2009. Vol. 34. P. 1726–1742.
<https://doi.org/10.1002/esp.1856>
- Owens P., Slaymaker O. Late Holocene sediment yields in small alpine and subalpine drainage basins, British Columbia / D.E. Walling, T.R. Davies, B. Hasholt (Eds). *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*. IAHS Publication 209. IAHS: Wallingford, 1992. P. 147–154.
- Putyrskaya V., Klemt E., Röllin S., Corcho-Alvarado J.A., Sahli H. Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using ^{137}Cs and ^{210}Pb // *J. Environ. Radioact.* 2020. Vol. 212. 106135.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106135>
- Rose N.L., Morley D., Appleby P.G., Battarbee R.W., Alliksaar T., Guilizzoni P., Jeppesen E., Korhola A., Punning J.-M. Sediment accumulation rates in European lakes since AD 1850: trends, reference conditions and exceedance // *J. Paleolimnol.* 2011. Vol. 45. P. 447–468.
<https://doi.org/10.1007/s10933-010-9424-6>
- Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck W.J., Blackwell P.G., Ramsey C.B., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafliðason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser F.K., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott M.E., Southon J.R., Staff R.A., Turney C., van der Plicht J. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50e000 Years cal BP // *Radiocarb.* 2013. Vol. 55. №. 4. P. 1869–1887.
https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947
- Schlunegger F., Hinderer M. Pleistocene/Holocene climate change, re-establishment of fluvial drainage network and increase in relief in the Swiss Alps // *Terra Nova.* 2003. Vol. 15. P. 88–95.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2003.00469.x>
- Semertizidou P., Piliposian G.T., Chiverrell R.C., Appleby P.G. Long-term stability of records of fallout radionuclides in the sediments of Brotherswater, Cumbria (UK) // *J. Paleolimnol.* 2019. Vol. 61. P. 231–249.
<https://doi.org/10.1007/s10933-018-0055-7>
- Su C.-C., Huh C.-A. ^{210}Pb , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ in East China Sea sediments: sources, pathways and budgets of sediments and radionuclides // *Mar. Geol.* 2002. Vol. 183. P. 163–178.
[https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00165-2](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00165-2)
- Wang F., Wang H., Li J., Pei Y., Fan C., Tian L., Shang Z., Song M., Geng Y. ^{210}Pb and ^{137}Cs measurements in the Circum Bohai Sea coastal region: sedimentation rates and implications // *Front. Earth Sci. China.* 2008. Vol. 2. P. 276–282.
<https://doi.org/10.1007/s11707-008-0046-5>
- Xu M., Bogen J., Wang Z., Bønsnes T.E., Gytri S. Pro-glacial lake sedimentation from jökulhlaups (GLOF), Blåmannsisen, northern Norway // *Earth Surf. Process. Landf.* 2015. Vol. 40. P. 654–665.
<https://doi.org/10.1002/esp.3664>
- Yamada M., Aono T. ^{210}Pb and ^{234}Th in settling particles collected by time-series sediment traps in the Okinawa Trough // *Deep Sea Res. P. II: Top. Stud. Ocean.* 2003. Vol. 50. № 2. P. 487–501.
[https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00466-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00466-6)

Sedimentation Rates Evaluation in Caucasus Mountain Lakes as Indicators of Their Catchments Denudation

N. V. Kuzmenkova^{1, 2, *}, V. N. Golosov^{1, 3}, E. A. Grabenko¹, M. Y. Alexandrin¹,
 V. A. Shishkov¹, and O. N. Byhalova⁴

¹*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Faculty of Chemistry, Moscow State University, Moscow, Russia*

³*Faculty of Geography, Moscow State University, Moscow, Russia*

⁴*FGBU "State Reserve Utrish," Anapa, Russia*

*e-mail: kuzmenkovav@my.msu.ru

The sedimentation rates of five lakes in the Western and Central Caucasus in the late Holocene were studied on the basis of radioisotope dating (^{137}Cs of global and Chernobyl origin, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{14}C). The lakes are located in different landscape zones and has different origin. The selection of bottom sediment cores was carried out after a reservoir map of the depths monitoring based in areas with average maximum depths. The studied lakes catchments are minimally affected by anthropogenic impact; therefore, the reservoir influx of sediments, the sedimentation rate and their changes over time are mainly controlled by natural factors. It has been established that for two lakes in the mid-mountains with tinned and forested catchments, the current sediment accumulation rate is 0.05–0.07 cm/year, and half of it consist organic matter. Sedimentation rates in the high-

mountain Donguz-Orun Lake increases and have been equal to 0.32 cm/year in the last 30 years without taking into account the significant amount of sediment that is redeposited in the front of the reservoir delta. The opposite trend of sedimentation rates was revealed for the high-mountain Garabashi Lake, the distinctive feature of which is the absence of glaciers at present and a rather high projective cover of vegetation catchment. Sedimentation rates in the coastal Sukhoi Liman Lake, located in the low-mountain zone, are 0.1 cm/year with a slight growth trend due to some increase in anthropogenic load associated with local clearcuts and an increase in recreational load.

Keywords: sedimentation rates, lakes, radionuclides dating, denudation temps, Caucasus

REFERENCES

- Abril J.M. On the use of ^{210}Pb -based records of sedimentation rates and activity concentrations for tracking past environmental changes. *J. Environ. Radioact.*, 2022, vol. 244–245, p. 106823. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106823>
- Ahn Y.S. Recent changes in sedimentation rate in three lakes of Ishikari Wetland, Northern Japan determined by ^{210}Pb dating. *Water Resour.*, 2018, vol. 45, pp. 795–802. <https://doi.org/10.1134/S009780781805024X>
- Ahn Y.S., Nakamura F., Kizuka T., Nakamura Y. Elevated sedimentation in lake records linked to agricultural activities in the Ishikari River floodplain, northern Japan. *Earth Surf. Process. Landf.*, 2009, vol. 34, no. 12, pp. 1650–1660. <https://doi.org/10.1002/esp.1854>
- Aleksandrin M.Yu., Dar'in A.V., Grachev A.M., Solomina O.N. Dynamics of regional climatic conditions over the past 2000 years according to lithological and geochemical studies of bottom sediments of Lake Karakel (Western Caucasus). *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2019, no. 1, pp. 73–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019173-85>
- Appleby P.G., Oldfield F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. *Catena*, 1978, vol. 5, no. 1, pp. 1–8. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(78\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(78)80002-2)
- Carbon Isotope Techniques, 1991. Elsevier.
- Carrivick J.L., Tweed F.S. Proglacial lakes: character, behaviour and geological importance. *Quat. Sci. Rev.*, 2013, vol. 78, no. 15, pp. 34–52. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.028>
- Corbett D.R., Vance D., Letrick E., Mallinson D., Culver S., Decadal-scale sediment dynamics and environmental change in the Albemarle Estuarine System, North Carolina. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 2007, vol. 71, nos. 3–4, pp. 717–729. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.09.024>
- Corbett D.R., Walsh J.P. ^{210}Pb and ^{137}Cs : establishing a chronology for the last century, In *Handbook of Sea-Level Research*. Shennan I., Long A.J., Horton B.P., Eds. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2015, pp. 361–372. <https://doi.org/10.1002/9781118452547.ch24>
- Doering C., Akber R., Heijnis H. Vertical distributions of ^{210}Pb excess, ^7Be and ^{137}Cs in selected grass covered soils in Southeast Queensland, Australia. *J. Environ. Radioact.*, 2006, vol. 87, no. 2, pp. 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.11.005>
- Gao J., Long Y., Zhang X., Collins A.L., He X., Zhang Y., Shi Z. Interpreting sedimentation dynamics at Longxi catchment in the Three Gorges Area, China, using Cs-137 activity, particle size and rainfall erosivity. *J. Mt. Sci.*, 2016, vol. 13, pp. 857–869. <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3637-0>
- García-Ruiz J.M., Nadal-Romero E., Lana-Renault N., Beguería S. Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology*, 2013, vol. 198, pp. 20–36. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.023>
- Golosov V., Tsyplenkov A. Factors Controlling Contemporary Suspended Sediment Yield in the Caucasus Region. *Water*, 2021, vol. 13, 3173. <https://doi.org/10.3390/w13223173>
- Grachev A.M., Novenko E.Y., Grabenko E.A., Alexandrin M.Y., Zazovskaya E.P., Konstantinov E.A., Shishkov V.A., Lazukova L.I., Chepurnaya A.A., Kuderina T.M., Ivanov M.M., Kuzmenkova N.V., Darin A.V., Solomina O.N. The Holocene paleoenvironmental history of Western Caucasus (Russia) reconstructed by multi-proxy analysis of the continuous sediment sequence from Lake Khuko. *Holocene*, 2021, vol. 31, pp. 368–379. <https://doi.org/10.1177/0959683620972782>
- Hasholt B., Walling D.E., Owens P.N. Sedimentation in arctic proglacial lakes: Mittivakkat Glacier, south-east Greenland. *Hydrol. Process.*, 2000, vol. 14, pp. 679–699. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(200003\)14:4<679::AID-HYP966>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(200003)14:4<679::AID-HYP966>3.0.CO;2-E)
- Hinderer M., Kastowski M., Kamelger A., Bartolini C., Schlunegger F. River loads and modern denudation of the Alps – A review. *Earth-Sci. Rev.*, 2013, vol. 118, pp. 11–44. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.01.001>
- Hutchinson S.M., Akinyemi F.O., Mindrescu M., Begy R., Feurdean A. Recent sediment accumulation rates in contrasting lakes in the Carpathians (Romania): impacts of shifts in socio-economic regime. *Reg. Environ. Change*, 2016, vol. 16, pp. 501–513. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0764-7>
- Izrael Yu.A. *Atlas sovremennykh i prognoznykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoi AES na postradavshikh territoriyakh Rossii i Belarusi* [Atlas of Modern and Forecast Aspects of the Consequences of the Chernobyl Accident in the Affected Territories of Russia and Belarus]. Izrael Yu.A., Bogdevich I.M., Eds. Minsk: Belkartografiya, 2009. 140 p.
- Izrael Yu.A. The atlas of caesium-137 contamination of Europe after the Chernobyl accident. In *The radiological*

- consequences of the Chernobyl accident*. Brussels: European Commission, EUR 16544 EN. 1996, pp. 1–10.
- Klaar M.J., Kidd C., Malone E., Bartlett R., Pinay G., Chapin F.S., Milner A. Vegetation succession in deglaciated landscapes: implications for sediment and landscape stability. *Earth Surf. Process. Landf.*, 2015, vol. 40, pp. 1088–1100.
<https://doi.org/10.1002/esp.3691>
- Kotlyakov V.M., Khromova T.Y., Nosenko G.A., Popova V.V., Chernova L.P., Muraviev A.Y., Rototaeva O.V., Nikitin S.A., Zverkova N.M. *Recent Glacier Changes in Mountain Regions of Russia*. Moscow: KMK Scientific Press. 2015. 288 p.
- Kuzmenkova N.V., Ivanov M.M., Alexandrin M.Yu., Grachev A.M., Rozhkova A.K., Zhizhin K.D., Grabenko E.A., Golosov V.N. Use of natural and artificial radionuclides to determine the sedimentation rates in two North Caucasus lakes. *Environ. Pollut.*, 2020, vol. 262, 114269.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114269>
- Luque J.A., Julià R. Lake sediment response to land-use and climate change during the last 1000 years in the oligotrophic Lake Sanabria (northwest of Iberian Peninsula). *Sediment. Geol.*, 2002, vol. 148, pp. 343–355.
[https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00225-1](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00225-1)
- Mikhaleiko V.N., Kutuzov S.S., Lavrentiev I.I., Toropov P.A., Abramov A.A., Aleshina M.A., Gagarina L.V., Doroshina G.Ya., Zhino P., Kozachek A.V., Legrand M., Lim S., Nagornov O.V., Nosenko G.A., Polyukhov A.A., Potemkin A.D., Proinkert S., Rototaeva O.V., Smirnov A.M., Tarasov D.L., Tyufin S.A., Khairidinova A.G., Chernyakov G.A., Shestakova A.A., Yarynich Yu.I. *Ledniki i klimat Elbrusa* [Glaciers and Climate of Elbrus]. Moscow–St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2020. 372 p. ISBN: 978-5-4469-1671-9
- Nesje A. A Piston corer for lacustrine and marine sediments. *Arct. Alp. Res.*, 1992, vol. 24, pp. 257–259.
<https://doi.org/10.1080/00040851.1992.12002956>
- Otto J.-C., Schrott L., Jaboyedoff M., Dikau R. Quantifying sediment storage in a high alpine valley (Turtmannal, Switzerland). *Earth Surf. Process. Landf.*, 2009, vol. 34, pp. 1726–1742.
<https://doi.org/10.1002/esp.1856>
- Owens P., and Slaymaker O. Late Holocene sediment yields in small alpine and subalpine drainage basins, British Columbia. In *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*, Walling D.E., Davies T.R., Hasholt B., Eds. IAHS Publication 209. IAHS: Wallingford, 1992, pp. 147–154.
- Putyrskaya V., Klemm E., Röhlén S., Corcho–Alvarado J.A., Sahli H. Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using ^{137}Cs and ^{210}Pb . *J. Environ. Radioact.* 2020, vol. 212, 106135.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106135>
- Rose N.L., Morley D., Appleby P.G., Battarbee R.W., Alkisaar T., Guilizzoni P., Jeppesen E., Korhola A., Punning J.-M. Sediment accumulation rates in European lakes since AD 1850: trends, reference conditions and exceedence. *J. Paleolimnol.* 2011, vol. 45, pp. 447–468.
<https://doi.org/10.1007/s10933-010-9424-6>
- Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck W.J., Blackwell P.G., Ramsey C.B., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafflidason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser F.K., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott M.E., Southon J.R., Staff R.A., Turney C., van der Plicht J. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 2013, vol. 55, no. 4, pp. 1869–1887.
https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947
- Schlunegger F., Hinderer M. Pleistocene/Holocene climate change, re-establishment of fluvial drainage network and increase in relief in the Swiss Alps. *Terra Nova*, 2003, vol. 15, pp. 88–95.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2003.00469.x>
- Semertizidou P., Piliposian G.T., Chiverrell R.C., Appleby P.G. Long-term stability of records of fallout radionuclides in the sediments of Brotherswater, Cumbria (UK). *J. Paleolimnol.* 2019, vol. 61, pp. 231–249.
<https://doi.org/10.1007/s10933-018-0055-7>
- Su C.-C., Huh C.-A. ^{210}Pb , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ in East China Sea sediments: sources, pathways and budgets of sediments and radionuclides. *Mar. Geol.*, 2002, vol. 183, pp. 163–178.
[https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00165-2](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00165-2)
- Wang F., Wang H., Li J., Pei Y., Fan C., Tian L., Shang Z., Song M., Geng Y. ^{210}Pb and ^{137}Cs measurements in the Circum Bohai Sea coastal region: sedimentation rates and implications. *Front. Earth Sci. China*, 2008, vol. 2, pp. 276–282.
<https://doi.org/10.1007/s11707-008-0046-5>
- Xu M., Bogen J., Wang Z., Bonsnes, T.E., Gytri, S. Proglacial lake sedimentation from jökulhlaups (GLOF), Blåmannsisen, northern Norway. *Earth Surf. Process. Landf.*, 2015, vol. 40, pp. 654–665.
<https://doi.org/10.1002/esp.3664>
- Yamada M., Aono T. ^{210}Pb and ^{234}Th in settling particles collected by time-series sediment traps in the Okinawa Trough. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanogr.*, 2003, vol. 50, no. 2, pp. 487–501.
[https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00466-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00466-6)