

УДК 551.4.042

ОЦЕНКА ТЕМПОВ ПАЛЕОДЕНУДАЦИИ В ГОРАХ: ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2020 г. А. М. Грачев^{а, *}, В. Н. Голосов^{а, б}

^аИнститут географии РАН, Москва, Россия

^бМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

*e-mail: agrachev@igras.ru

Поступила в редакцию 02.11.2019 г.

После доработки 18.05.2020 г.

Принята к публикации 06.06.2020 г.

В статье систематизированы методы изучения темпов современной и палеоденудации и обобщены опубликованные данные об интенсивности палеоденудации, полученные на основе использования ¹⁰Ве и комплекса методов изучения озерных отложений для горных стран различных регионов мира. Показано, что в настоящее время наиболее изученными территориями в плане оценки темпов палеоденудации являются Альпы, Тибет, Скалистые горы и Анды. Скорости палеоденудации, определенные для речных и озерных водосборов в различных частях мира, изменяются в широких пределах в интервале 2–3240 м/млн лет. Аналогично закономерности, выявленной для современной денудации, прослеживается высокая корреляция между темпами палеоденудации и уклонами водосборов. Тем не менее локальные ландшафтные особенности конкретных речных бассейнов и их изменения в течение голоцена определяют пространственную вариабельность и динамику изменений темпов денудации во времени. Роль деятельности человека усиливается и приводит к 10–100-кратному усилению денудации горных стран, в первую очередь в пределах предгорно-низкогорного пояса.

Ключевые слова: голоцен, горы, денудация, количественные методы, озерные осадки, ¹⁰Ве

DOI: 10.31857/S2587556620050076

ВВЕДЕНИЕ

Количественная оценка темпов денудации и их изменения во времени является фундаментальной задачей для понимания процессов перераспределения вещества на суше и его выноса в мировой океан. В настоящее время существует широкий набор инструментальных и аналитических методов, использование которых с разной степенью точности позволяет оценивать скорость денудации за разные интервалы времени. Среди них активно развивается метод оценки темпов денудации, основанный на определении следовых количеств изотопа бериллия ¹⁰Ве в кварце [8, 32].

К числу приоритетных задач, стоящих перед исследователями, относятся точное определение темпов денудации в горных районах [25] и их пространственно-временных изменений в региональном и глобальном масштабах [34]. Известно, что более половины глобальной денудации происходит в горных районах, на которые приходится лишь ~10% суши [28]. Под денудацией здесь подразумевается суммарное перемещение материала горных пород за счет эрозии и механического переноса.

Темпы денудации в горах весьма существенно меняются как в историческом, так и в геологиче-

ском масштабах времени, что связано с климатическими изменениями, увеличением антропогенной нагрузки, а также колебаниями сейсмо-тектонической активности. В этой связи, актуальными являются работы по оценке палеоденудации горных регионов за различные промежутки времени, начиная от столетий и до всего голоцена. В одной из основополагающих работ Дж. Дирина [14] была обозначена необходимость реконструкции длительных денудационных временных рядов, без наличия которых невозможно подойти к решению проблемы прогнозирования воздействия изменений климата и деятельности человека на сток наносов. Природный архив, позволяющий реконструировать подобные ряды, заключен в донных отложениях озер. Для реконструкции с использованием озерных осадков используется большое количество индикаторов: магнитная восприимчивость, пыльца, диатомовые водоросли, изотопы, биомаркеры, древняя ДНК и т.д. [10, 17]. Простейший индикатор палеоденудации – скорость осадконакопления, параметр, который меняется во времени, т.е. по глубине донных отложений. Изменение этого параметра отражает динамику темпов денудации в локальном, а при наличии достаточного числа исследованных объектов и в региональном масштабе. Скорость осад-

конакопления можно отследить на временном срезе, охватывающем голоцен, внутри которого благодаря озерным и другим палеорекострукциям восстанавливаются изменения климатических условий и, в сочетании с археологическими данными, последствия деятельности человека [31].

Целью данной работы является обзор методов оценки денудации. Рассматриваются результаты оценки изменений денудации за различные интервалы времени внутри голоцена для ряда горных стран, полученные с использованием набора методов. Ключевые работы по рассматриваемой теме обобщены в работах [32] и [38] и здесь мы цитируем лишь работы, которые не процитированы в этих обзорах.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАЛЕОДЕНУДАЦИИ ГОРНЫХ СТРАН

Технологический прогресс последних десятилетий в значительной мере повлиял на совершенствование в части повышения точности традиционных методов оценки темпов денудации и способствовал появлению новых подходов. К первой группе относятся как методы датирования отложений, которые позволяют определить возраст отдельных пачек отложений в зонах аккумуляции, так и методы оценки суммарной денудации. В частности, речь идет о получившем большое распространение использовании ^{10}Be , измерение содержания которого в образцах кварцевого речного песка позволяют определять среднегоголетние темпы денудации для водосбора, расположенного выше по течению от места отбора [32]. Сочетание различных методов датировки от Чернобыльского и глобального изотопа цезия ^{137}Cs [21, 24] и атмосферной составляющей изотопа свинца ^{210}Pb , которые широко используются для оценки темпов аккумуляции за несколько десятилетий [35], до методов радиоуглеродного датирования, тефрохронологии, подсчета варв и других методов датировки [38, 40], позволяет реконструировать изменения темпов денудации на водосборе исследуемого водоема за интервалы времени от года до десятков тысяч лет (рис. 1). Следует понимать, что для корректной оценки скоростей денудации требуется также определить суммарный объем отложений, накопившихся за каждый из продатированных интервалов времени, что предполагает изучение не менее двух колонок отложений и измерение общей площади зоны аккумуляции исследуемого водоема. В случаях, если отбор донных отложений проводится в проточном водоеме, полученные величины среднегоголетних темпов денудации являются минимальными, так как часть материала, поступившего в водоем, теряется совместно со стоком вытекающей из него воды. К числу других методов датирования, не упомянутых ранее, относятся также следующие: по космогенной экспозиции, космогенному захоронению и на основе оптиче-

ски-стимулированной люминесценции (см. ссылки в работе [38]). Также к этой группе можно отнести некоторые косвенные методы, например спорово-пыльцевой метод [3].

Для работ по изучению палеоденудации в горах наибольший интерес представляют бассейновые оценки, выполненные на основе применения ^{10}Be , а также реконструкции, выполненные на основе озерных осадков.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ^{10}Be ДЛЯ ОЦЕНОК ТЕМПОВ ПАЛЕОДЕНУДАЦИИ ГОРНЫХ СТРАН

Использование ^{10}Be для определения темпов денудации насчитывает уже более 20 лет. За этот период данный метод был усовершенствован [32, 38], что повысило надежность количественных оценок, полученных при его использовании, особенно для бассейнов горных рек, где доля вторичного вовлечения аллювиальных отложений в суммарный объем денудации сравнительно незначителен [22, 30]. В то время как измерения стока наносов рек позволяют оценить современные темпы денудации, определение содержания ^{10}Be в кварце усредняет этот же параметр для периода ~100–100 тыс. лет [32]. Полученные оценки денудации горных районов на основе использования ^{10}Be распределены крайне неравномерно по континентам и различным горным массивам (табл. 1).

Значительный разброс значений по темпам денудации даже в пределах одного региона объясняется тем обстоятельством, что на интенсивность экзогенных процессов влияет целый ряд факторов. Некоторые из основных факторов достаточно тесно взаимосвязаны, особенно в горах. Например, в целом прослеживается достаточно хорошая зависимость темпов денудации от среднего уклона бассейна [32]. Эта зависимость выявляется в гораздо большей степени для отдельных малых речных бассейнов, расположенных внутри более крупного речного бассейна. При этом очевидно, что средний уклон бассейна реки обратно пропорционально зависит от его площади. При прочих равных условиях среднегоголетние темпы денудации в предгорно-низкогорных бассейнах со средними высотами ниже 1500 м характеризуются значениями темпов денудации менее 100 м/млн лет (см. табл. 1). В высокогорье наибольшие темпы денудации характерны для бассейнов со значительной долей склонов ранее подверженных ледниковой экзарации. Также существенную роль играет соотношение площадей междуречий, занятых скальными выходами и почвами. Увеличение площади междуречий с почвенным покровом способствует снижению темпов денудации и, напротив, рост площадей со скальными выходами и оголенными склонами способствует росту суммарной денудации на водосборе (см. ссылки в работе [32]). Важным фактором интен-



Рис. 1. Временная шкала для различных методов, используемых для исследования современной и палеоденудации (за основу взят рисунок из [38]).

сивности денудации является сейсмоструктура, которая способствует активизации экзогенных процессов. Именно поэтому, например, темпы денудации в горах штата Калифорния существенно превышают интенсивность денудационных процессов в горах штата Юта [32] (см. табл. 1). Из климатических характеристик наиболее значимое влияние на темпы денудации оказывает слой осадков. Но его влияние заметно проявляется только при значительном градиенте выпадающих дождей. Например, четко выраженный тренд снижения темпов денудации, направленный с юго-запада на северо-восток и совпадающий с трендом снижения суммарного слоя осадков, выявлен для юго-восточной окраины Тибета (см. ссылки в работе [32]).

В региональном отношении изученность палеоденудации речных бассейнов горных стран различных континентов с использованием ¹⁰Ве весьма неоднородна, тем не менее можно проследить некоторые закономерности. В частности, наиболее низкие темпы денудации выявлены в Андах (Южная Америка), горах центральной и южной Африки, а также горах острова Шри-Ланка (см. табл. 1). Лимитирующие факторы для этих территорий, способствующие относительно низким темпам денудации, различны. Это сравнительно малые уклоны склонов в случае плоскогорий чилийских Анд, что ведет к переотложению значительной части материала на междуречьях и высокое проективное покрытие склонов растительно-

стью для остальных из перечисленных выше территорий (см. ссылки в работе [32]). Максимальная интенсивность палеоденудации отмечается в пределах наиболее тектонически активных из числа изученных территорий: Альпы в Европе и Береговые хребты штата Калифорния (см. табл. 1).

В целом применение ¹⁰Ве позволило к настоящему времени собрать обширную базу данных по палеоденудации ряда регионов мира. Данные о темпах палеоденудации, полученные для различных притоков внутри одного речного бассейна, указывают на наличие четкой закономерности их сокращения по мере увеличения площади бассейна. Однако полученные данные не позволяют оценить вклад бассейновой и русловой составляющих [1] в суммарную денудацию речных бассейнов, так как характеризуют суммарный вынос материала за пределы речного бассейна в его замыкающем створе.

ОЦЕНКА ТЕМПОВ ПАЛЕОДЕНУДАЦИИ В ГОРАХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОЗЕРНЫХ КЕРНОВ

Временной диапазон для проведения прямых наблюдений за процессами денудации в горах, очевиден, ограничен несколькими десятилетиями. Это не позволяет детально разобраться в сложных механизмах воздействия на темпы денудации процессов, которые происходят на длитель-

Таблица 1. Диапазон значений темпов денудации, полученных на основе использования ^{10}Be , для ряда речных бассейнов (со средними высотами >1000 м), расположенных на различных континентах

№	Географические координаты		Регион	Средняя высота бассейна, м	Средний уклон бассейна, °	Площадь бассейна, км ²	Темпы денудации, м/млн лет
	широта, °	долгота, °					
Европа							
1	46.5	8.2	Альпы	1874–2758	10–29	0.3–14.6	106–367
2	46.5	8.4		1012–2550	16–35	4–326	268–184
3	46.6	11.2		1313–2439	21–34	14–841	208–184
4	46.7	8.1		1002–2700	16–29	–	94–3237
5	47.9	8.0	Германия	1010–1248	9–24	0.9–36.5	28–108
6	45.0	3.5	Центральная Европа	1006–1340	8–10	5–1866	31–81
Азия							
7	6.8	80.8	Шри-Ланка	1033–2206	5–38	0.15–22.96	2–69
8	7.2	80.8		1005–1867	7–20	0.01–778	6–57
9	7.3	80.8		1324–1875	8–30	0.01–778	4–26
10	28.5	105.3	р. Янцзы и притоки, Китай	1324–4410	4–10	–	40–366
11	29.1	98.4	Тибет и юго-запад Китая	1316–5057	3–19	2–310726	12–529
12	29.9	95.1	Тибет	3082–4866	8–23	10.9–228000	119–415
13	30.8	101.6		1948–4489	4–37	3.39–174.8	19–177
14	31.3	103.7		1419–3622	22–31	5–22309	583–821
15	34.6	100.7		3704–4295	15–27	0.84–5.01	54–100
16	39.1	100.2		1579–2974	7–27	0.23–31.9	34–544
17	39.2	98.9		1906–4317	8–29	0.5–10080	20–1482
Африка							
18	–22.7	16.2	Намибия	1035–1802	0.9–24	1–29000	4–14
19	1.1	36.1	Кения	1258–2246	1–18	1.1–5203	0.001–0.1
Северная Америка							
20	34.2	–117.0	Калифорния	1365–2547	8–35	0.3–19	55–322
21	34.3	–118.0		1006–2317	9–36	0.11–174.7	37–366
22	38.5	–119.9		1035–2408	3–43	0.04–11.15	10–112
23	40.1	–120.1		1320–1562	7–17	0.014–0.23	23–88
24	35.3	–107.3	Нью-Мексико	1800–2462	2–7	169–16153	7–365
25	35.6	–83.4	Сев. Каролина, Теннесси	1028–1520	16–22	1–37	20–57
26	39.0	–118.0	Монтана	2060–2537	14–22	0.1–45	65–420
27	40.8	–111.8	Юта	2118–2884	23–36	1.84–13.51	57–732
28	45.4	–115.6	Айдахо	1496–2063	10–24	0.21–35079	30–154
Южная Америка							
29	–14.5	–66.1	Боливия	1017–3311	7–22	1600–159000	142–862
30	–16.0	–67.9		1533–4517	15–33	<1–70200	12–1010
31	–17.1	–68.0		3915–4363	2–17	13.7–17900	3–57
32	–18.5	–64.8		1044–3533	11–28	5–3763	27–790
33	–18.3	–70.0	Чили	3463–4342	8–12	1330–3341	12–26
34	–23.7	–69.3		1209–3610	0–31	–	0.1–12
35	–5.0	–79.9	Перу	1033–3076	7–30	0.2–2917	7–246

Примечание. Таблица подготовлена по материалам [32, Supplement]. Из полного массива данных (1789 значений) отобраны данные для речных бассейнов со средними высотами более 1000 м. Исходные работы с <8 значений для высот >1000 м исключены из рассмотрения. Ввиду ряда обнаруженных нестыковок значений не рассматривалась также работа Delunel et al. (2010).

ных временных масштабах, таких как, например, разнонаправленные движения горных ледников. Ретроспективный анализ геоморфологических и биогеохимических процессов прошлого возможен на основе изучения состава и датировок донных отложений в озерах на временной шкале от сотен лет до всего голоцена [7, 26]. Тенденции изменений в голоцене на качественном уровне известны уже достаточно давно. Так, например, естественные изменения денудации в голоцене на фоне меняющегося климата оказались существенно меньше по величине, чем изменения, происходящие за счет деятельности человека [14].

Архив донных отложений озер дает непрерывную картину изменений денудации на фоне меняющегося климата, растительности и ледниковой обстановки, а также антропогенного влияния. Методические основы подобных исследований были заложены еще в 1970-х годах. В последние годы совершенствование методов обеспечило переход к новому качеству реконструкций палеоденудации [18, 23, 38]. На смену достаточно простому инструментарию, который позволял проводить грубые оценки, основанные на множестве допущений [13], приходит целый набор комплементарных методов, обеспечивающих независимую верификацию полученных данных о темпах денудации за различные интервалы времени [23]. В настоящее время имеются палеолетописи климата и широкого спектра характеристик окружающей среды для всех континентов, но пока с недостаточным географическим покрытием [17, 31]. Зачастую наблюдается большой контраст: количество палеоозерных работ по Альпам исчисляется сотнями, в то время как на Кавказе, динамика горного оледенения изучена достаточно хорошо, а материалы по озерным архивам только начинают накапливаться [2, 4].

Исследования палеоденудации в горах на основе изучения озерных кернов также представляют интерес с точки зрения сопоставления темпов перераспределения материала в различных высотных поясах гор, которые были подвержены влиянию деятельности человека в различной степени. Отсутствие подобного контекста являлось бы принципиальным препятствием для решения ряда прогнозных задач [14, 15]. Денудационные процессы прошлого в горах естественным образом архивированы в горных и предгорных озерах. Они служат своего рода масштабными седиментационными ловушками, в которых непрерывно откладывается материал, поступающий со всего водосборного бассейна [39]. В работе [39] отмечается, что для реконструкции палеоденудации наилучшим образом подходят малые округлые озера, с крутыми склонами. Водосборный бассейн при этом должен быть небольшой площади и характеризоваться простым гидрологическим режимом.

Стоит отметить, следуя [39], что в естественной природной системе горное озеро – водосборный бассейн заложено существенное преимущество по сравнению с прямыми точечными инструментальными наблюдениями за отдельными экзогенными процессами. Седиментационный архив на основе единичной озерной колонки не только характеризует весь водосборный бассейн, но и позволяет проследить изменения темпов денудации во времени [39]. Для получения палеолетописи денудации образцы, отобранные из колонки озерного осадка, прежде всего, датируются. Возрастная модель строится на основе подсчета годичных слоев, если это возможно, и данных радиоуглеродного датирования на современных установках AMS (accelerator mass-spectrometry) с независимой верификацией по природному изотопу ^{210}Pb и техногенному изотопу ^{137}Cs для наиболее молодых отложений. Независимыми индикаторами изменений темпов денудации во времени являются скорость осадконакопления, изменений магнитной восприимчивости и содержание химических элементов в керне.

В последнее время для качественной оценки изменения денудации на основе озерных кернов используются, в частности, изотопы лития и урана. Эти методы были использованы для качественных реконструкций палеоденудации для озер в Австралии и в Европе [18, 36]. На основе анализа донных отложений Дойранского озера (Греция, Македония) была выявлена аномальная эрозия 3.5–3.1 тыс. лет до н. в., обусловленная бурным развитием сельского хозяйства в регионе в этот период [36].

По Альпам, которые на данный момент наиболее детально изучены с точки зрения оценки денудации, следует отметить качественные реконструкции изменений темпов денудации, охватывающие голоцен частично или полностью, выполненные для следующих озер: Ла Туиль [7], Аннеси [33], Ледро [27], Изео [29], Паладриу [16], Мондзе [37], Антерн [20], Бурже [5, 6], Павин [11]. Одним из примеров подобной реконструкции изменения темпов денудации для голоцена могут служить результаты исследования, выполненного на оз. Ла Туиль (рис. 2). Данная летопись достаточно репрезентативна, хотя в Альпах могут наблюдаться региональные особенности. В начале голоцена наблюдается повышенная денудация, далее в среднем голоцене интенсивность экзогенных процессов достигает минимальных значений. Начиная с 4.5 тыс. лет до н. в. значения интенсивности экзогенных процессов повышается на фоне изменения климата. Наконец, в последние тысячелетия денудация все более возрастает, что связано с ростом антропогенного воздействия. Похожая динамика изменений темпов палеоденудации выявлена и для водосборного бассейна оз. Бурже [6]. В последние годы появились исследования с количественными оценками па-

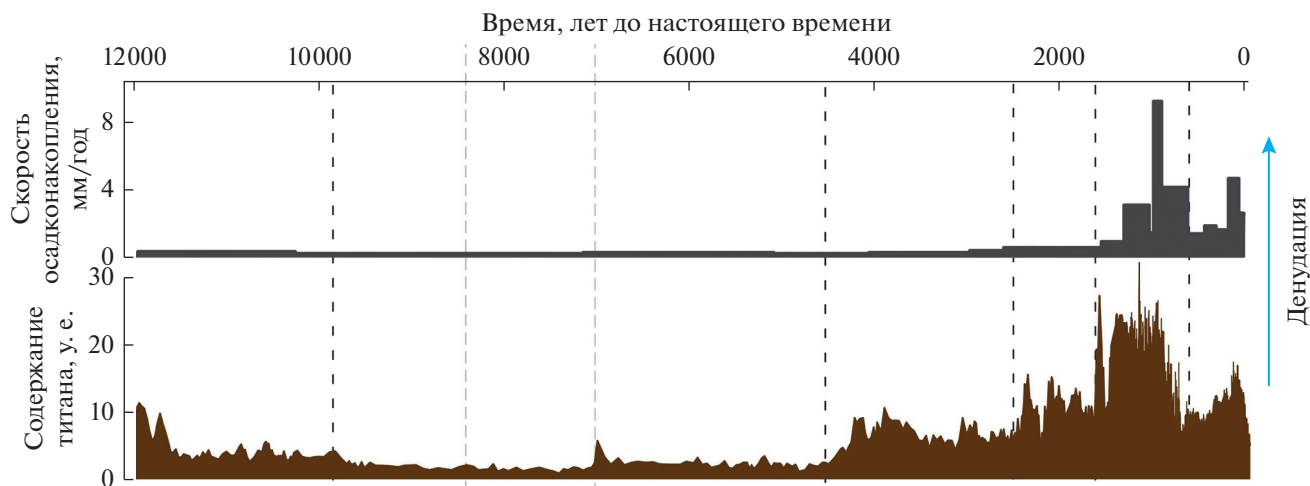


Рис. 2. Качественная картина изменений денудации в голоцене на основе палеолетописи оз. Ла Туиль (на основе [7]). Концентрация титана используется как индикатор терригенной компоненты (в качестве косвенного индикатора денудации). *Примечание.* Используется с официального разрешения издательства.

леоденудации на основе интерпретации озерных отложений, однако подобных работ на данный момент сравнительно немного (табл. 2).

Достаточно сложно судить о достоверности оценок темпов палеоденудации, полученных для одной и той же горной страны на основе ^{10}Be и датированных донных отложений озер. Это связано с большим разбросом величин даже для сопоставимых по площади и расположенных в одном высотном поясе речных и озерных водосборов (см. табл. 1 и 2). Разброс может объясняться, как фактическими различиями в темпах денудации, обусловленными геолого-геоморфологическими особенностями каждого из водосборов, так и неточностью методов оценки. Тем не менее, единичные исследования, в которых для одного водосбора темпы палеоденудации определялись одновременно на основе датировок донных отложений озера и кварцевого песка, отобранного на отмелях впадающей в озеро реки, показали хорошую сходимость для интервала времени, охватывающего последние четыре тысячелетия [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценки темпов денудации и их изменений во времени для горных стран в настоящее время имеются практически для всех континентов, хотя до сих пор имеются достаточно обширные территории, для которых подобные исследования еще не проводились либо имеются только единичные оценки, пока не позволяющие переходить к серьезным обобщениям. К числу относительно более изученных территорий относятся Альпы в Европе, Тибет в Азии, Скалистые горы в Северной Америке и южноамериканские Анды. Диапазон значений темпов палеоденудации, полученный

на основе использования различных методов достаточно широк даже в пределах одного региона, что указывает на многофакторность процессов и условий выветривания материала, его перераспределения по пути транспортировки со склонов в русла рек и собственно по речной сети. Тем не менее можно говорить об определенных тенденциях и зависимостях, среди которых наиболее четко прослеживается достаточно тесная связь между темпами денудации и средним уклоном водосбора. В среднем по мере роста уклонов водосборов темпы современной и палеоденудации в ненарушенных деятельностью человека горных территориях возрастают от низкогорий, где они составляют от 1 до 100 м/млн лет, до 500–1500 м/млн лет в высокогорном поясе. Однако за счет антропогенной деятельности скорости денудации в низкогорном поясе могут увеличиваться на порядок по сравнению с природными. При этом в горах подобные всплески эрозии нередко отмечались и 1000–2000 лет назад.

Динамика изменений темпов денудации в горах внутри голоцена наиболее достоверно может быть оценена на основе изучения палеоархивов донных отложений горных озер. Имеющиеся к настоящему времени данные свидетельствуют о цикличности изменения темпов денудации за период голоцена. Тем не менее, пока еще недостаточен имеющийся банк данных для объективного разделения влияния локальных особенностей перераспределения материала в пределах конкретного водосбора и региональных закономерностей, прослеживающихся для обширных территорий.

Пока еще имеются только отдельные исследования, где для одного или группы речных бассейнов для оценки денудации одновременно использовался набор методов, включающий датировки

Таблица 2. Темпы палеодеградации для различных временных интервалов внутри голоцена, полученные на основе интерпретации озерных кернов

Озеро	Хольцмар, Айфель (Германия)	Бурже, Альпы (Франция)	Штаппиц, Альпы (Австрия)	Тамар, Анды (Чили)	Хамбре, Анды (Чили)	Палеозеро Сугута, Восточно-Африканская рифтовая долина (Кения)
Методический подход	Подсчет варвов, скорость осадконакопления	Скорость осадконакопления, геохимия	^{10}Be в осадке	Скорость осадконакопления, тевра	Скорость осадконакопления, тевра	^{10}Be в осадке
Высота, м	425	231	1272	40	90	
Глубина, м	20	145	5–10	22	16	
Площадь водосбора, км ²	2.058	560	33.6	0.81	0.11	
Темпы палеодеградации [временной интервал, годы]	16 т/км ² /год 64 м/млн лет* [13800–9800 до н.в.]	15 мг/см ² /год 6 м/млн лет* [9500–4700 до н.в.]	1300 м/млн лет [11000–7000 до н.в.]	6.39 т/км ² /год 26 м/млн лет* [12900–4150 до н.в.]	23.42 т/км ² /год 94 м/млн лет* [15000–4150 до н.в.]	60 м/млн лет [11800 до н.в.]
	1.5 т/км ² /год 6 м/млн лет* [9800–2700 до н.в.]	30 мг/см ² /год 12 м/млн лет* [4700–1600 до н.в.]	400 м/млн лет [7000–5000 до н.в.]	5.64 т/км ² /год 23 м/млн лет* [4150–0 до н.в.]	8.43 т/км ² /год 34 м/млн лет* [4150–0 до н.в.]	20 м/млн лет [8700 до н.в.]
	14 т/км ² /год 56 м/млн лет* [2700–0 до н.в.]	200 мг/см ² /год 80 м/млн лет* [1600–50 до н.в.]	800 м/млн лет [5000–0 до н.в.]			10 м/млн лет [0 до н.в.]
Источник	[39]	[6]	[23]	[9]	[9]	[19]

*Пересчитанные значения (использовано значение плотности 2.5 г/см³).

озерных отложений и речного песка с использованием ^{10}Be . Они свидетельствуют о хорошей схожимости в определении скоростей денудации, полученных на основе применения ^{10}Be и выявленными для приповерхностных горизонтов донных отложений, охватывающий интервал времени в последние четыре тысячелетия. При этом достаточно большой разброс величин темпов денудации, полученных на основе ^{10}Be , выявлен для различных бассейнов рек, расположенных в одном высотном поясе в пределах одной горной системы. Это может быть связано как с фактическими различиями в темпах денудации в пределах речных бассейнов, обусловленных различиями в строении рельефа и литологии пород, так и недостаточной точностью метода.

Дальнейшие исследования необходимы как в части более широкого территориального охвата исследованиями по оценке современной и палеоденудации, в частности горных стран на территории России, так и в плане совершенствования точности существующих и разработки новых методов оценки интенсивности экзогенных процессов и темпов перераспределения вещества на суше.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Раздел данной работы по ^{10}Be подготовлен в рамках госзадания Института географии РАН 0148-2019-0005 (АААА-А19-119021990091-4). Работа над остальными разделами велась в рамках проекта РНФ №19-17-00181 “Количественная оценка бассейновой составляющей стока наносов и ее изменений в голоцене на реках Кавказа”.

FUNDING

The section on ^{10}Be was prepared within the framework of the state-ordered research theme of the Institute of Geography RAS, no. 0148-2019-0005. The work on remaining sections was financially supported by the Russian Science Foundation, project no. 19-17-00181 (“Quantitative Assessment of the Slope Sediment Flux and Its Changes in the Holocene for the Caucasus Mountain Rivers”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мозжерин В.В.* Расчленение стока взвешенных наносов рек Северной Евразии на русловую и бассейновую составляющие и его геоморфологическая интерпретация. Региональные исследования природно-территориальных комплексов // Под ред. В.В. Сироткина, Р.П. Денмухаметова. Казань: Меддок, 2012. С. 93–100.
2. *Соломина О.Н., Калугин И.А., Дарьин А.В., Чепурная А.А., Александрин М.Ю., Кудерина Т.М.* Использование геохимического и пыльцевого анализов отложений оз. Каракель для реконструкции климатических изменений в долине р. Теберда (Северный Кавказ) в позднем голоцене: возможности и ограничения // Вопросы географии. Сб. 137: Горные исследования. М.: Издательский дом Кодекс, 2014. С. 234–266.
3. *Чепурная А.А., Новенко Е.Ю.* База данных спорово-пыльцевых спектров территории России и сопредельных стран как инструмент палеоэкологических исследований // Изв. РАН. Сер. геогр. 2015. № 1. С. 119–128.
4. *Alexandrin M., Darin A., Kalugin I., Grachev A., Dolgova E., Solomina O.* Annual sedimentary record from Lake Donguz-Orun (Central Caucasus) constrained by high resolution SR-XRF analysis and its potential for climate reconstructions // *Frontiers in Earth Sci.* 2018. V. 6. 158 p.
5. *Arnaud F., Révillon S., Debret M., Revel M., Chapron E., Jacob J., Giguët-Covex C., Poulenard J., Magny M.* Lake Bourget regional erosion patterns reconstruction reveals Holocene NW European Alps soil evolution and paleohydrology // *Quat. Sci. Rev.* 2012. V. 51. P. 81–92.
6. *Arnaud F., Poulenard J., Giguët-Covex C., Wilhelm B., Révillon S., Jenny J.-P., Marie Revel M., Enters D., Bajard M., Fouinat L., Doyen E., Simonneau A., Pignol C., Chapron E., Vannièrre B., Sabatier P.* Erosion under climate and human pressures: An alpine lake sediment perspective // *Quat. Sci. Rev.* 2016. V. 152. P. 1–18.
7. *Bajard M., Sabatier P., David F., Develle A.-L., Reyss J.-L., Fanget B., Malet E., Arnaud D., Augustin L., Crouzet C., Poulenard J., Arnaud F.* Erosion record in lake La Thuile sediments (Prealps, France): Evidence of montane landscape dynamics throughout the Holocene // *Holocene.* 2015. V. 26. № 3. P. 350–364.
8. *Bookhagen B., Strecker M.R.* Spatiotemporal trends in erosion rates across a pronounced rainfall gradient: Examples from the southern Central Andes // *Earth and Planetary Sci. Lett.* 2012. V. 327. P. 97–110.
9. *Breuer S., Kilian R., Baeza O., Lamy F., Arz H.* Holocene denudation rates from the superhumid southernmost Chilean Patagonian Andes (53° S) deduced from lake sediment budgets // *Geomorphology.* 2013. V. 187. P. 135–152.
10. *Catalan J., Pla-Rabés S., Wolfe A.P., Smol J.P., Rühland K.M., Anderson N.J., Kopáček J., Stuchlík E., Schmidt R., Koinig K.A., Camarero L., Flower R.J., Heiri O., Kamenik C., Korhola A., Leavitt P.R., Psenner R., Renberg I.* Global change revealed by palaeolimnological records from remote lakes: a review // *J. Paleolimnology.* 2013. V. 49. № 3. P. 513–535.
11. *Chassiot L., Miras Y., Chapron E., Develle A.L., Arnaud F., Motelica-Heino M., Di Giovanni C.* A 7000-year environmental history and soil erosion record inferred from the deep sediments of Lake Pavin (Massif Central, France) // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* 2018. V. 497. P. 218–233.
12. *Colombaroli D., Gavin D.G., Morey A.E., Thorndycraft V.R.* High resolution lake sediment record reveals self-organized criticality in erosion processes regulated by internal feedbacks // *Earth Surface Processes and Landforms.* 2018. V. 43. № 10. P. 2181–2192.
13. *Dearing J.A., Alström K., Bergman A., Regnell J., Sandgren P.* Past and present erosion in southern Sweden / *In Soil Erosion on Agricultural Land.* J. Boardman, I. Foster, J. Dearing (Eds.). Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 1990. 687 p.
14. *Dearing J.A., Jones R.T.* Coupling temporal and spatial dimensions of global sediment flux through lake and marine sediment records // *Global and Planetary Change.* 2003. V. 39. № 1–2. P. 147–168.
15. *Dearing J., Braimoh A., Reenberg A., Turner B., Van der Leeuw S.* Complex land systems: the need for long time

- perspectives to assess their future // *Ecology and Society*. 2010. V. 15. № 4.
16. Doyen E., Begeot C., Simonneau A., Millet L., Chapron E., Arnaud F., Vanniere B. Land use development and environmental responses since the neolithic around Lake Paladru in the French pre-alps // *J. Archaeol. Sci. Rep.* 2016. V. 7. P. 48–59.
 17. Dubois N., Saulnier-Talbot É., Mills K., Gell P., Battarbee R., Bennion H., Chawchai S., Dong X., Francus P., Flower R., Gomes D.F., Gregory-Eaves I., Humane S., Kattel G., Jenny J.P., Langdon P., Massafiero J., McGowan S., Mikomägi A., Ngoc N.T.M., Ratnayake A.S., Reid M., Rose N., Saros J., Schillereff D., Tolotti M., Valero-Garcés B. First human impacts and responses of aquatic systems: A review of palaeolimnological records from around the world // *The Anthropocene Review*. 2018. V. 5. № 1. P. 28–68.
 18. Francke A., Dosseto A., Panagiotopoulos K., Leicher N., Lacey J.H., Kyrikou S., Wagner B., Zanchetta G., Kouli K., Leng M.J. Sediment residence time reveals Holocene shift from climatic to vegetation control on catchment erosion in the Balkans // *Global and Planet. Change*. 2019. V. 177. P. 186–200.
 19. Garcin Y., Schildgen T.F., Acosta V.T., Melnick D., Guillemoteau J., Willenbring J., Strecker M.R. Short-lived increase in erosion during the African Humid Period: Evidence from the northern Kenya Rift // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2017. V. 459. P. 58–69.
 20. Giguet-Covex C., Arnaud F., Poulenard J., Disnar J.-R., Delhon C., Francus P., David F., Enters D., Rey P.-J., Delannoy J.-J. Changes in erosion patterns during the Holocene in a currently treeless subalpine catchment inferred from lake sediment geochemistry (Lake Anterne, 2063 m a.s.l., NW French Alps): The role of climate and human activities // *Holocene*. 2011. V. 21. № 4. P. 651–665.
 21. Golosov V.N., Belyaev V.R., Markelov M.V., Kislenko K.S. Overbank sedimentation rates on the floodplains of small rivers in Central European Russia // In *Sediment dynamics for a changing future*. V. 337 of IAHS Publ. Wallingford, UK, IAHS Press, 2010. P. 129–136.
 22. Granger D.E., Schaller M. Cosmogenic nuclides and erosion at the watershed scale // *Elements*. 2014. V. 10. № 5. P. 369–373.
 23. Grischott R., Kober F., Lupker M., Reitner J.M., Drescher-Schneider R., Hajdas I., Christl M., Willett S.D. Millennial scale variability of denudation rates for the last 15 kyr inferred from the detrital ¹⁰Be record of Lake Stappitz in the Hohe Tauern massif, Austrian Alps // *Holocene*. 2017. V. 27. № 12. P. 1914–1927.
 24. Gusarov A.V., Golosov V.N., Ivanov M.M., Sharifullin A.G. Influence of relief characteristics and landscape connectivity on sediment redistribution in small agricultural catchments in the forest-steppe landscape zone of the Russian Plain within European Russia // *Geomorphology*. 2019. V. 327. P. 230–247.
 25. Hilger L., Beylich A.A. Sediment Budgets in High-Mountain Areas: Review and Challenges // In *Geomorphology of Proglacial Systems*. Springer, 2019. P. 251–269.
 26. Hinderer M., Einsele G. The world's large lake basins as denudation-accumulation systems and implications of their lifetimes // *J. Paleolimnology*. 2001. V. 26. № 4. P. 355–372.
 27. Joannin S., Magny M., Peyron O., Vanniere B., Galop D. Climate and land- use change during the late Holocene at Lake Ledro (Southern Alps, Italy) // *Holocene*. 2014. V. 24. № 5. P. 591–602.
 28. Larsen I.J., Montgomery D.R., Greenberg H.M. The contribution of mountains to global denudation // *Geology*. 2014. V. 42. № 6. P. 527–530.
 29. Lauterbach S., Chapron E., Brauer A., Huls M., Gilli A., Arnaud F., Piccin A., Nomade J., Desmet M., von Grafenstein U., DecLakes Participants A sedimentary record of Holocene surface runoff events and earthquake activity from Lake Iseo (Southern Alps, Italy) // *Holocene*. 2012. V. 22. № 7. P. 749–760.
 30. Lupker M., France-Lanord C., Lavé J., Bouchez J., Galy V., Métivier F., Gaillardet J., Lartiges B., Mugnier J.-L. A Rouse-based method to integrate the chemical composition of river sediments: Application to the Ganga basin // *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2011. V. 116 (F4).
 31. Mills K., Schillereff D., Saulnier-Talbot É., Gell P., Anderson N.J., Arnaud F., Dong X., Jones M., McGowan S., Massafiero J., Moorhouse H., Perez L., Ryves D.B. Deciphering long-term records of natural variability and human impact as recorded in lake sediments: a palaeolimnological puzzle // *Wiley Interdisciplinary Rev.: Water*. 2017. V. 4. № 2. e1195.
 32. Mishra A.K., Placzek C., Jones R. Coupled influence of precipitation and vegetation on millennial-scale erosion rates derived from ¹⁰Be // *PLoS ONE*. 2019. V. 14. № 1. e0211325 and the Supplement.
 33. Noel H., Garbolino E., Brauer A., Lallier-Verges E., de Beaulieu J.-L., Disnar J.-R. Human impact and soil erosion during the last 5000 yrs as recorded in lacustrine sedimentary organic matter at Lac d'Annecy, the French Alps // *J. Paleolimnol.* 2001. V. 25. P. 229–244.
 34. Panin A. Land-ocean sediment transfer in palaeotimes, and implications for present-day natural fluvial fluxes // *Sediment transfer through the fluvial system* / V. Golosov, V. Belyaev, D.E. Walling (Eds.). IAHS Publ., 2004. V. 288. P. 115–124.
 35. Robbins J.A., Edgington D.N. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137 // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1975. V. 39. P. 285–304.
 36. Rothacker L., Dosseto A., Francke A., Chivas A.R., Vigier N., Kotarba-Morley A.M., Menozzi D. Impact of climate change and human activity on soil landscapes over the past 12,300 years // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. № 1. P. 1–7.
 37. Swierczynski T., Lauterbach S., Dulski P., Delgado J., Merz B., Brauer A. Mid- to late Holocene flood frequency changes in the northeastern Alps as recorded in varved sediments of Lake Mondsee (Upper Austria) // *Quat. Sci. Rev.* 2013. V. 80. P. 78–90.
 38. Turowski J.M., Cook K.L. Field techniques for measuring bedrock erosion and denudation // *Earth Surf. Process. Landforms*. 2017. V. 42. P. 109–127.
 39. Zolitschka B.A. 14,000 year sediment yield record from western Germany based on annually laminated lake sediments // *Geomorphology*. 1998. V. 22. № 1. P. 1–17.
 40. Zolitschka B. Dating based on freshwater- and marine-laminated sediments / In *Global change in the Holocene*, 2003. P. 92–106.

Evaluation of the Paleodenudation Rates in the Mountains: Main Approaches and Results

A. M. Grachev^{1,*} and V. N. Golosov^{1,2}

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

²*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

*e-mail: agrachev@igras.ru

The article systematizes methods for studying modern and paleodenudation rates and summarizes the published data on the paleodenudation intensity obtained using ¹⁰Be and a set of methods for studying lake sediments for mountainous areas of different regions of the world. It has been shown that currently the most studied territories in terms of assessing paleodenudation rates are the European Alps, Tibet, the Rocky Mountains, and the Andes. Paleodenudation rates determined for river and lake catchments in various parts of the world vary over a wide range in the interval 2–3240 m/10⁶ years. Similarly to the regularities revealed for modern denudation, there is a high correlation between the paleodenudation rates and the catchments slopes. Nevertheless, the local landscape features of specific river basins and their changes during the Holocene determine the spatial variability and dynamics of changes in the denudation rate over time. The role of human activity intensifies and leads to a 10 to 100-fold increase in the denudation of mountainous areas, primarily within the foothills and low mountains.

Keywords: Holocene, mountains, denudation, quantitative methods, lake sediments, ¹⁰Be

REFERENCES

- Moszhernin V.V. Separation of suspended sediment yield of northern Eurasia rivers into channel and basin components and its geomorphological interpretation. In *Regional'nie issledovaniya prirodno-territorial'nikh kompleksov* [Regional Studies of Natural-Territorial Complexes]. Sirotkin V.V., Denmukhametov R.R., Eds. Kazan: Meddock Publ., 2012, pp. 93–100. (In Russ.).
- Solomina O.N., Kalugin I.A., Dar'in A.V., Chepur-naya A.A., Aleksandrin M.Yu., Kuderina T.M. The use of geochemical and pollen analyses of the sediments of Lake Karakel for reconstruction of climate change in the valley of the Teberda river (North Caucasus) in the Late Holocene: opportunities and limitations. *Voprosy Geografii* [Problems of Geography]. Vol. 137: *Gornye Issledovaniya* [Mountain Studies]. Moscow: Kodeks Publ., 2014, pp. 234–266. (In Russ.).
- Chepur-naya A.A., Novenko E.Yu. Database of spore-pollen spectra of the territory of Russia and neighboring countries as an instrument of paleoecological research. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2015, no. 1, pp. 119–128. (In Russ.).
- Alexandrin M., Darin A., Kalugin I., Grachev A., Dolgova E., Solomina O. Annual sedimentary record from Lake Donguz-Orun (Central Caucasus) constrained by high resolution SR-XRF analysis and its potential for climate reconstructions. *Front. Earth Sci.*, 2018, vol. 6, 158 p. doi 10.3389/feart.2018.00158
- Arnaud F., Révillon S., Debret M., Revel M., Chapron E., Jacob J., Giguet-Covex C., Poulénard J., Magny M. Lake Bourget regional erosion patterns reconstruction reveals Holocene NW European Alps soil evolution and paleohydrology. *Quat. Sci. Rev.*, 2012, vol. 51, pp. 81–92.
- Arnaud F., Poulénard J., Giguet-Covex C., Wilhelm B., Révillon S., Jenny J.-P., Marie Revel M., Enters D., Bajard M., Fouinat L., Doyen E., Simonneau A., Pignol C., Chapron E., Vannièrre B., Sabatier P. Erosion under climate and human pressures: An alpine lake sediment perspective. *Quat. Sci. Rev.*, 2016, vol. 152, pp. 1–18.
- Bajard M., Sabatier P., David F., Develle A.-L., Reyss J.-L., Fangeat B., Malet E., Arnaud D., Augustin L., Crouzet C., Poulénard J., Arnaud F. Erosion record in lake La Thuile sediments (Prealps, France): Evidence of montane landscape dynamics throughout the Holocene. *Holocene*, 2015, vol. 26, no. 3, pp. 350–364.
- Bookhagen B., Strecker M.R. Spatiotemporal trends in erosion rates across a pronounced rainfall gradient: Examples from the southern Central Andes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2012, vol. 327, pp. 97–110.
- Breuer S., Kilian R., Baeza O., Lamy F., Arz H. Holocene denudation rates from the superhumid southernmost Chilean Patagonian Andes (53° S) deduced from lake sediment budgets. *Geomorphology*, 2013, vol. 187, pp. 135–152.
- Catalan J., Pla-Rabés S., Wolfe A.P., Smol J.P., Rühland K.M., Anderson N.J., Kopáček J., Stuchlík E., Schmidt R., Koinig K.A., Camarero L., Flower R.J., Heiri O., Kamenik C., Korhola A., Leavitt P.R., Psenner R., Renberg I. Global change revealed by palaeolimnological records from remote lakes: a review. *J. Paleolimnol.*, 2013, vol. 49, no. 3, pp. 513–535.
- Chassiot L., Miras Y., Chapron E., Develle A.L., Arnaud F., Motelica-Heino M., Di Giovanni C. A 7000-year environmental history and soil erosion record inferred from the deep sediments of Lake Pavin (Massif Central, France). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 2018, vol. 497, pp. 218–233.
- Colombaroli D., Gavin D.G., Morey A.E., Thorndy-craft V.R. High resolution lake sediment record reveals self-organized criticality in erosion processes regulated by internal feedbacks. *Earth Surf. Proc. Land.*, 2018, vol. 43, no. 10, pp. 2181–2192.
- Dearing J.A., Alström K., Bergman A., Regnell J., Sandgren P. Past and present erosion in southern Sweden. In *Soil Erosion on Agricultural Land*. Boardman J., Foster I., Dearing J., Eds. Chichester: John Wiley and Sons, 1990, 687 p.
- Dearing J.A., Jones R.T. Coupling temporal and spatial dimensions of global sediment flux through lake and marine sediment records. *Global Planet. Change*, 2003, vol. 39, no. 1–2, pp. 147–168.
- Dearing J., Braimoh A., Reenberg A., Turner B., Van der Leeuw S. Complex land systems: the need for long time perspectives to assess their future. *Ecol. Soc.*, 2010, vol. 15, no. 4.

16. Doyen E., Begeot C., Simonneau A., Millet L., Chapron E., Arnaud F., Vanniere B. Land use development and environmental responses since the neolithic around Lake Paladru in the French pre-alps. *J. Archaeol. Sci. Rep.*, 2016, vol. 7, pp. 48–59.
17. Dubois N., Saulnier-Talbot É., Mills K., Gell P., Battarbee R., Bennion H., Chawchai S., Dong X., Francus P., Flower R., Gomes D.F., Gregory-Eaves I., Humane S., Kattel G., Jenny J.P., Langdon P., Massaferrero J., McGowan S., Mikomägi A., Ngoc N.T.M., Ratnayake A.S., Reid M., Rose N., Saros J., Schillereff D., Tolotti M., Valero-Garcés B. First human impacts and responses of aquatic systems: A review of palaeolimnological records from around the world. *Anthropocene Rev.*, 2018, vol. 5, no.1, pp. 28–68.
18. Francke A., Dosseto A., Panagiotopoulos K., Leicher N., Lacey J.H., Kyrikou S., Wagner B., Zanchetta G., Kouli K., Leng M.J. Sediment residence time reveals Holocene shift from climatic to vegetation control on catchment erosion in the Balkans. *Global Planet. Change*, 2019, vol. 177, pp. 186–200.
19. Garcin Y., Schildgen T.F., Acosta V.T., Melnick D., Guillemoteau J., Willenbring J., Strecker M.R. Short-lived increase in erosion during the African Humid Period: Evidence from the northern Kenya Rift. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2017, vol. 459, pp. 58–69.
20. Giguet-Covex C., Arnaud F., Poulenard J., Disnar J.-R., Delhon C., Francus P., David F., Enters D., Rey P.-J., Delannoy J.-J. Changes in erosion patterns during the Holocene in a currently treeless subalpine catchment inferred from lake sediment geochemistry (Lake Anterne, 2063 m a. s. l., NW French Alps): The role of climate and human activities. *Holocene*, 2011, vol. 21, no. 4, pp. 651–665.
21. Golosov V.N., Belyaev V.R., Markelov M.V., Kislenko K.S. Overbank sedimentation rates on the floodplains of small rivers in central European Russia. In *Sediment Dynamics for a Changing Future*. Wallingford, UK: IAHS Press, 2010, pp. 129–136.
22. Granger D.E., Schaller M. Cosmogenic nuclides and erosion at the watershed scale. *Elements*, 2014, vol. 10, no. 5, pp. 369–373.
23. Grischott R., Kober F., Lupker M., Reitner J.M., Drescher-Schneider R., Hajdas I., Christl M., Willett S.D. Millennial scale variability of denudation rates for the last 15 kyr inferred from the detrital ¹⁰Be record of Lake Stappitz in the Hohe Tauern massif, Austrian Alps. *Holocene*, 2017, vol. 27, no. 12, pp. 1914–1927.
24. Gusarov A.V., Golosov V.N., Ivanov M.M., Sharifullin A.G. Influence of relief characteristics and landscape connectivity on sediment redistribution in small agricultural catchments in the forest-steppe landscape zone of the Russian Plain within European Russia. *Geomorphology*, 2019, vol. 327, pp. 230–247.
25. Hilger L., Beylich A.A. Sediment budgets in high-mountain areas: Review and challenges. In *Geomorphology of Proglacial Systems*. Heckmann T., Morche D., Eds. Cham: Springer, 2019, pp. 251–269.
26. Hinderer M., Einsele G. The world's large lake basins as denudation-accumulation systems and implications of their lifetimes. *J. Paleolimnol.*, 2001, vol. 26, no. 4, pp. 355–372.
27. Joannin S., Magny M., Peyron O., Vanniere B., Galop D. Climate and land- use change during the late Holocene at Lake Ledro (Southern Alps, Italy). *Holocene*, 2014, vol. 24, no. 5, pp. 591–602.
28. Larsen I.J., Montgomery D.R., Greenberg H.M. The contribution of mountains to global denudation. *Geology*, 2014, vol. 42, no. 6, pp. 527–530.
29. Lauterbach S., Chapron E., Brauer A., Huls M., Gilli A., Arnaud F., Piccin A., Nomade J., Desmet M., von Grafenstein U., DecLakes Participants. A sedimentary record of Holocene surface runoff events and earthquake activity from Lake Iseo (Southern Alps, Italy). *Holocene*, 2012, vol. 22, no. 7, pp. 749–760.
30. Lupker M., France-Lanord C., Lavé J., Bouchez J., Galy V., Métivier F., Gaillardet J., Lartiges B., Mugnier J.-L. A Rouse-based method to integrate the chemical composition of river sediments: Application to the Ganga basin. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2011, vol. 116, no. F4.
31. Mills K., Schillereff D., Saulnier-Talbot É., Gell P., Anderson N.J., Arnaud F., Dong X., Jones M., McGowan S., Massaferrero J., Moorhouse H., Perez L., Ryves D.B. Deciphering long-term records of natural variability and human impact as recorded in lake sediments: a palaeolimnological puzzle. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2017, vol. 4, no. 2, e1195.
32. Mishra A.K., Placzek C., Jones R. Coupled influence of precipitation and vegetation on millennial-scale erosion rates derived from ¹⁰Be. *PLoS ONE*, 2019, vol. 14, no. 1, e0211325 and the Supplement.
33. Noel H., Garbolino E., Brauer A., Lallier-Verges E., de Beaulieu J.-L., Disnar J.-R. Human impact and soil erosion during the last 5000 yrs as recorded in lacustrine sedimentary organic matter at Lac d'Annecy, the French Alps. *J. Paleolimnol.*, 2001, vol. 25, pp. 229–244.
34. Panin A. Land-ocean sediment transfer in palaeotimes, and implications for present-day natural fluvial fluxes. In *Sediment Transfer through the Fluvial System*. Golosov V., Belyaev V., Walling D.E., Eds. IAHS Publ., vol. 288. IAHS, 2004, pp. 115–124.
35. Robbins J.A., Edgington D.N. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1975, vol. 39, pp. 285–304.
36. Rothacker L., Dosseto A., Francke A., Chivas A.R., Vigier N., Kotarba-Morley A.M., Menozzi D. Impact of climate change and human activity on soil landscapes over the past 12300 years. *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 1–7.
37. Swierczynski T., Lauterbach S., Dulski P., Delgado J., Merz B., Brauer A. Mid-to late Holocene flood frequency changes in the northeastern Alps as recorded in varved sediments of Lake Mondsee (Upper Austria). *Quat. Sci. Rev.*, 2013, vol. 80, pp. 78–90.
38. Turowski J.M., Cook K.L. Field techniques for measuring bedrock erosion and denudation. *Earth Surf. Proc. Land.*, 2017, vol. 42, pp. 109–127.
39. Zolitschka B. A 14,000 year sediment yield record from western Germany based on annually laminated lake sediments. *Geomorphology*, 1998, vol. 22, no. 1, pp. 1–17.
40. Zolitschka B. Dating based on freshwater- and marine-laminated sediments. In *Global change in the Holocene*. Mackay A., Battarbee R., Birks J., Oldfield F., Eds. Routledge, 2003, pp. 92–106.