

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 551.31

ТЕМПЫ СОВРЕМЕННОЙ ДЕНУДАЦИИ МАЛОГО ВОДОСБОРА В СРЕДНЕГОРНОМ ПОЯСЕ БОЛЬШОГО КAVКАЗА (НА ПРИМЕРЕ ВОДОСБОРА ГИТЧЕ-ГИЖГИТ)

С.В. Харченко¹, В.Н. Голосов², А.С. Цыпленков³, А.В. Федин⁴, М.И. Успенский⁵

^{1–3,5} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

^{1,2,4} Институт географии РАН, лаборатория геоморфологии

² Казанский федеральный университет, институт экологии и природопользования

¹ Кафедра геоморфологии и палеогеографии, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: xar4enkkoff@yandex.ru

² Лаборатория эрозии почв и русловых процессов, вед. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: gollossov@gmail.com

³ Лаборатория эрозии почв и русловых процессов, мл. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: atsyplenkov@gmail.com

⁴ Лаборатория геоморфологии, аспирант; e-mail: fedinanton@mail.ru

⁵ Кафедра геоморфологии и палеогеографии, магистрант; e-mail: kizyalleski@gmail.com

Количественная оценка объемов перемещаемого современными экзогенными процессами рыхлообломочного материала выполнена для малого среднегорного водосбора ($F = 1,86 \text{ км}^2$), расположенного в бассейне р. Баксан, на основе применения ряда независимых методов (эрозионное моделирование и геоморфологическое картографирование). Суммарный объем вынесенного материала установлен на основе оценки мощностей донных отложений, накопившихся в водоеме, расположенном в замыкающем створе водосбора. Темпы плоскостной и ручейковой эрозии выявлены по результатам повторных съемок с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и методом шпилек. Скорости обвальнo-осыпных процессов установлены на основе повторного наземного лазерного сканирования. Дополнительно привлечены опубликованные данные по темпам экзогенных процессов в горах. По результатам полевого картирования и дешифрирования космоснимков составлена карта распространения ведущих экзогенных процессов. На основе детальной съемки с БПЛА построена цифровая модель рельефа. С использованием данных о среднегодовых скоростях ведущих экзогенных процессов, карты их распространения по площади водосбора и индекса связности потоков наносов проведена оценка объема рыхлообломочного материала, доставляемого в водоем. Установлено, что среднесуточные темпы денудации водосбора составляют 0,16 мм/год. При этом только порядка 3–10% наносов, перемещаемых внутри водосбора, доставляются при формировании поверхностного стока в водоем. Модуль стока наносов, рассчитанный на основе оценки объемов отложений в водоеме, составил 514 т/(км²·год). Он сопоставим с модулями стока наносов малых рек, дренирующих среднегорный пояс Альп с аналогичной литологией коренных пород, выявленными на основе длительных наблюдений за стоком воды и наносов на гидропостях.

Ключевые слова: денудация, БПЛА, лазерное сканирование, связность потоков наносов, коэффициент доставки наносов, донные отложения

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.4

ВВЕДЕНИЕ

Особенности формирования бассейновой составляющей стока наносов рек в среднегорном поясе умеренной климатической зоны достаточно слабо исследованы в настоящее время. Это обусловлено двумя обстоятельствами. Во-первых, имеется пока еще очень ограниченный набор количественных данных об интенсивности различных процессов денудации в пределах водосборов [Pawlik, Šamonil, 2018; Hendrickx et al., 2020]. Во-вторых, находятся в стадии совершенствования модели, позволяющие оценивать доставку наносов со склонов в постоян-

ные водотоки [Vente et al., 2007; Messenzehl et al., 2014]. Тем не менее установлено, что основными факторами, сочетание которых определяет интенсивность различных экзогенных процессов, наиболее широко представленных в этом высотном поясе, являются: структурно-литологические особенности, морфология склонов, гидрометеорологические условия, проективное покрытие почв и степень антропогенной нарушенности [Naregeweyn et al., 2008]. Современные методы полевых и дистанционных исследований позволяют детально оценивать пространственно-временные изменения

большой части вышеперечисленных факторов. Исключением являются гидрометеорологические факторы, для которых весьма сложно детализировать внутригодовую и межгодовую динамику в связи с ограниченным числом метеорологических станций в горах и значительной вариативностью микроклиматических особенностей каждого из исследуемых водосборов. Это обстоятельство не ограничивает достоверность среднесуточных оценок темпов денудации, но в значительной мере влияет на выявление повторяемости экстремальных событий, которые определяют темпы денудации в пределах малых водосборов [Kirchner et al., 2001].

В этой связи наличие в замыкающем створе небольшого водосбора водоема с известным сроком эксплуатации открывает широкие возможности для верификации количественных оценок перераспределения наносов на склонах и их поступления в гидрографическую сеть. Оценки объемов выноса рыхлообломочного материала в постоянные водотоки возможны при использовании расчетных методов, основанных на применении ГИС-технологий, для оценки индекса связности потоков наносов (ИС) [Borselli et al., 2008]. Точность подобных оценок контролируется детальностью цифровых моделей рельефа (ЦМР) исследуемого водосбора, которая в идеале должна иметь разрешение 1 м [Cantreul et al., 2018], и наличием данных о темпах ведущих экзогенных процессов. ЦМР с 1 м разрешением является наиболее компромиссным вариантом между степенью детальности отображения рельефа и эффективностью компьютерных расчетов индекса связности потока наносов, который используется для расчета доставки рыхлообломочного материала при формировании склонового стока в постоянный водоток [Sougnuez et al., 2011; Cavalli et al., 2013]. Следует учитывать, что экстремальные события по-разному воздействуют на ИС. Имеющиеся варианты могут быть сгруппированы в три группы: а) снижение ИС в связи с возникновением участков переотложения наносов внутри линейных элементов флювиального рельефа; б) возврат к ранее существовавшим условиям стока; в) увеличение ИС благодаря формированию новых промоин за счет врезания линейных флювиальных форм [Bracken et al., 2015].

По сути, использование ИС позволяет оценить объем рыхлообломочного материала, выносимого за пределы водосбора за определенный временной интервал с учетом его локального переотложения по пути транспортировки. Соотношение суммарных объемов материала, перемещенного различными экзогенными процессами, с объемами наносов, выносимых за пределы исследуемого водосбора, характеризует коэффициент доставки наносов

(SDR). Подобные оценки для среднегорного пояса гор альпийской складчатости в целом немногочисленны [Messenzehl et al., 2014] и отсутствуют для среднегорного пояса Большого Кавказа.

Цель данного исследования состоит в количественной оценке среднегодовых объемов рыхлообломочного материала, перемещаемого внутри и выносимого за пределы малого водосбора, расположенного в среднегорном поясе Большого Кавказа за последние 30–35 лет на основе использования различных методов и подходов.

Объект исследований. В качестве объекта исследования выбран водосбор пруда Гитче-Гижгит, который расположен в среднем течении бассейна р. Баксан (рис. 1). Выбор данного водосбора обусловлен рядом обстоятельств. Во-первых, известны история появления и характер функционирования этого искусственного водоема, что позволяет оценить суммарный объем наносов, переотложившихся в нем за период его существования. Во-вторых, относительная компактность его водосбора ($F = 1,86 \text{ км}^2$), минимальное наличие древесной растительности, локально произрастающей только в днище основной долины, и низкая антропогенная нагрузка на склоны, а именно нерегулярный выпас скота.

В период с 1989 до 2000 г. пруд был частью более крупного водоема, возникшего после сооружения плотины на р. Гижгит, который включал ныне существующие озеро Уллу-Гижгит, пруд Гитче-Гижгит и участок днища долины р. Гижгит ниже по течению от их слияния. Озеро Уллу-Гижгит вплоть до 2001 г. использовалось как хвостохранилище Тырныаузского ГОКа. В водоем сбрасывалась пульпа отработанной и измельченной породы, которая постепенно заполняла данный водоем по направлению от плотины к его верховьям. Фактически пруд Гитче-Гижгит полностью изолировался от озера (водоема) Уллу-Гижгит в 2000 г.

В геолого-геоморфологическом отношении водосбор располагается в зоне распространения куэстового рельефа, характерного для Скалистого хребта Большого Кавказа. Это связано с моноклиальным залеганием среднеюрских терригенно-органогенных осадочных комплексов (джорская и гандалбосская свиты) с направлением падения пластов от осевой зоны Большого Кавказа к его северной периферии. В нижней части разреза они представлены аргиллитами, алевролитами и песчаниками, а в верхней – известняками, гипсами, доломитами и карбонатными аргиллитами [Геология СССР..., 1968]. Исследуемый водосбор является левобережным притоком протянувшейся с запада на восток р. Гижгит, левого притока р. Баксана. В общем виде левый борт долины р. Гижгит – аструктурный, эрозионный, крутой. Правый борт долины – структурный, более пологий,

почти без выходов коренных пород, с преобладанием процессов массового смещения грунта, задернованный. Исследуемый водосбор малого пруда Гитче-Гиджит полностью располагается на аструктурном склоне родительского водосбора. Это обуславливает значительные уклоны, наличие выступов коренных пород, сравнительно маломощный рыхлый чехол, составляющий от 5 до 40 см. Склоны задернованы в разной степени, что объясняется использованием водосбора для выпаса скота, более интенсивного в недавнем прошлом. Об этом свидетельствуют сохранившиеся остатки примитивных «фундаментов» загонов для скота. Древесно-кустарниковая растительность встречается только по днищу основной долины. Суммарное среднегодовое количество осадков по данным м/с Тырныауз составляет 850 мм, причем большая их часть выпадает в теплое время года в виде дождей разной интенсивности с максимумом в мае – июле. Количество осадков в холодное время года небольшое.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полевые исследования на водосборе Гитче-Гижигт включали несколько видов работ. Для всего водосбора была проведена съемка с беспилотного летательного аппарата с высот от 100 до 300 м в разных его частях, по результатам которой была построена ЦМР с разрешением 27 см. ЦМР была передискретизована до разрешения 1 м для избавления от избыточной детальности и зашумленности. Было проведено полевое крупномасштабное геоморфологическое картографирование водосбора с выделением участков с доминированием какого-либо экзогенного процесса. На основе дешифрирования ортофотоплана совместно с результатами полевого обследования была построена карта современных экзогенных процессов (рис. 2), которая в дальнейшем использовалась для расчета площади склонов, на которых развивается тот или иной экзогенный процесс (табл. 1).

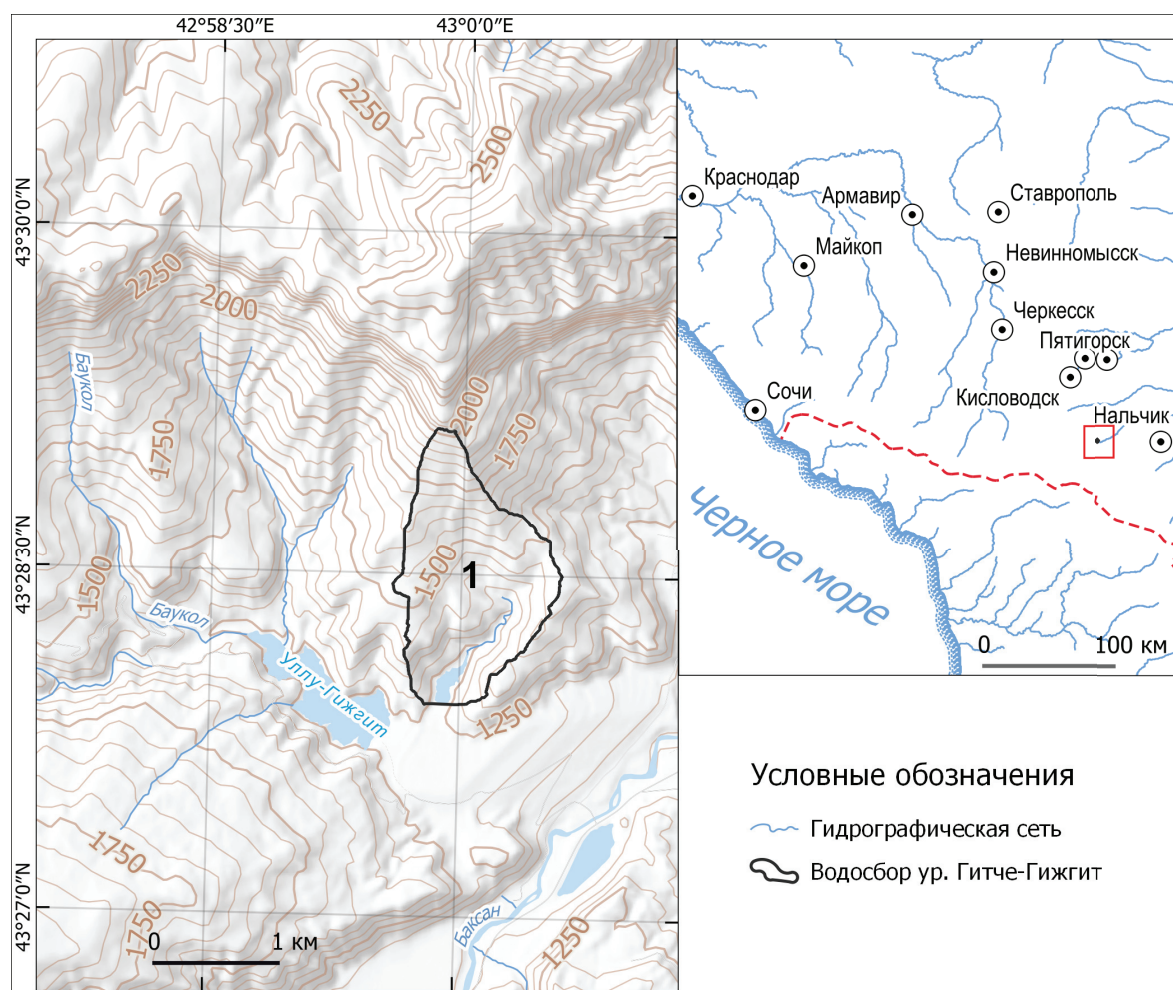


Рис. 1. Положение исследуемого водосбора Гитче-Гижигт в пределах Большого Кавказа и бассейна р. Баксан:
1 – водосбор Гитче-Гижигт

Fig. 1. Location of the studied Gitche-Gizhgit catchment within the Greater Caucasus and the Baksan River basin:
1 – the Gitche-Gizhgit catchment boundary

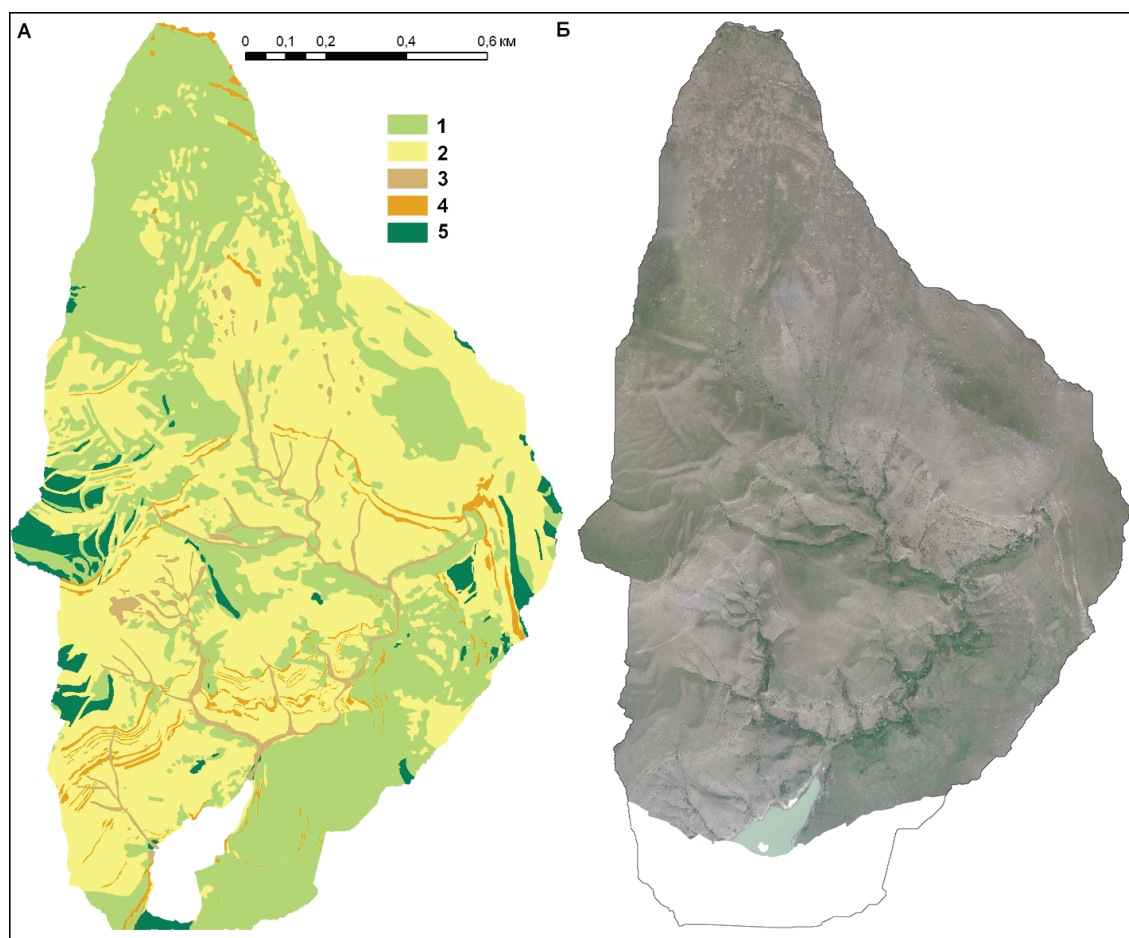


Рис. 2. Ведущие экзогенные процессы (А) и ортофотоплан (Б) водосбора Гитче-Гижигит: 1 – медленные массовые смещения грунта; 2 – плоскостная и ручейковая эрозии; 3 – линейная эрозия; 4 – обвально-осыпные процессы; 5 – условно стабильные поверхности. Для каждого контура обозначен доминирующий процесс

Fig. 2. Map of the principal earth surface processes (A) and the orthophotomap (Б) of the Gitche-Gizhgiz catchment area: 1 – creep; 2 – rill and sheet erosion; 3 – linear erosion; 4 – rockfall processes; 5 – virtually stable surfaces. The dominant earth surface process is indicated on the map for each contour

Таблица 1

Некоторые характеристики участков развития ведущих экзогенных процессов

Тип поверхностей	Площадь, га	Средняя абсолютная высота, м	Средняя крутизна склонов, градус	Относительный VARI*
Склоны медленных массовых смещений грунта	74,6	1483 ± 197	29 ± 10,8	1
Склоны с преобладанием плоскостной и ручейковой эрозии	88,9	1399 ± 119	29 ± 10,6	0
Поверхности с активной линейной эрозией	4,9	1321 ± 90	25,2 ± 10	0,81
Обвально-осыпные склоны	4,8	1377 ± 144	42 ± 15,2	0,06
Поверхности без выраженных экзогенных процессов	3,4	1422 ± 60	7,6 ± 6,9	0,88
Весь водосбор	176,2	1433 ± 160	28,7 ± 11,4	0,43

Примечание. *Visible Atmospherically Resistant Index (Gitelson et al., 2002) – параметр, отвечающий проективному покрытию зеленой растительности, извлекаемый из данных в RGB-палитре (например, фотокамеры бюджетных БПЛА). Выступает как частичный аналог NDVI.

Для определения скорости эрозионных и обвально-осыпных процессов были организованы мониторинговые наблюдения на двух площадках. Для оценки темпов эрозионно-аккумулятивных процессов была выбрана площадка с сильно разреженным травянистым покровом, на которой одновременно протекают процессы плоскостного смыва и линейного размыва, площадью порядка 1300 м². Оценка производилась путем сравнения ЦМР, построенных по результатам съемки с БПЛА с высоты 15–20 м. В итоге получены результаты для двух временных интервалов: август 2020 – май 2021 г. и май – июль 2021 г. Синхронно проводились оценки смыва / аккумуляции методом шпилек, которые были установлены на различных элементах рельефа внутри площадки. Вторая площадка мониторинга за обвально-осыпными процессами располагалась на крутом борту линейного вреза – выходе на поверхность коренных пород. Оценка скорости отступления склона выполнена на основе использования метода повторного наземного лазерного сканирования. Съемка производилась с расстояния 15–20 м с инструментальной погрешностью не более 1,5–2 мм. Вычислена модель разницы отметок, из которой удался интервал в пределах удвоенной погрешности измерений, – ± 3 мм. Это сделано для устранения из результатов расчета тех изменений поверхности, которые могут быть обусловлены погрешностью съемки. Все, как отрицательные (денудация склона), так и положительные (аккумуляция на склоне) значения за пределами этого интервала, принимались как достоверные. Построены две растровые модели поверхности стенки с разрешением 2,5 см.

Темпы крипа ранее были определены при исследовании плато Бийчесын, расположенного в 55 км к западу от водосбора Гитче-Гижгит также в пределах среднегорного пояса, с использованием метода Янга [Ажигиров, Голосов, 1990]. Учитывая короткий период наблюдений за ведущими экзогенными процессами, за исключением наблюдений за крипом, полученные данные о темпах основных экзогенных процессов не отражают среднесуточные значения, но могут служить в качестве оценочных при их сопоставлении с опубликованными данными для аналогичных горных массивов. Для оценки среднегодовых темпов основных процессов денудации были собраны и обобщены опубликованные данные, полученные на Кавказе и в других горных странах альпийского пояса.

Суммарные объемы среднегодовой денудации для водосбора Гитче-Гижгит получены на основе перемножения площади распространения каждого из процессов с учетом повсеместного, за исключением скальных выходов проявления крипа на их среднегодовые темпы с учетом поправки на крутиз-

ну. Это связано с тем, что, например, скорости отступления скальных стенок (1,3 мм/год) оценены по нормали к поверхности уступов, т. е. практически по горизонтали, а площади скальных стенок – в проекции субвертикальных уступов на горизонтальную площадь. Таким образом, реальные объемы камнепадов многократно занижаются. Для устранения этого эффекта скорости экзогенных процессов, оцененные по нормали к склону, делились на косинус крутизны склона.

Суммарный объем наносов, вынесенных за пределы водосбора, определен на основе оценок объемов отложений в пруду за период его существования. Для этого в августе 2020 г. были проведены промерные работы для построения карт глубин озера и мощности донных отложений, накопившихся в водоеме. Для измерения использовались комплекты гидрометрических штанг ГР-57, один из которых был оборудован башмаком (пяткой) круглой формы, прикреплявшимся к нижней части штанги и препятствующим ее погружению в дисперсные донные грунты (в том числе илистые). Обе штанги погружались в точку измерения, штанга без башмака продавливалась в донные отложения с усилием 10 кг/см² до максимально возможной глубины. Измерение по ней, таким образом, соответствовало глубине твердого дна (песка, гальки под накопленными илистыми отложениями). Измерения по укомплектованной башмаком штанге показывали глубину до активного слоя (поверхности толщи илистых отложений), которая дополнительно контролировалась по показаниям эхолота. Толщина слоя илистых отложений оценивалась по разнице двух измерений, выполняемых в трехкратной повторности. Положение промерной точки засекалось по встроенной в эхолот GPS. Для создания карты донных отложений водоемов точечные данные были интерполированы при помощи обобщенной аддитивной модели (Thin Plate Regression Spline [Wood et al., 2008]), используя также данные о глубине в качестве предиктора. Параметры сплайна моделируемых значений толщины донных отложений подбирались автоматически при помощи библиотеки mgcv [Wood, 2011] языка R. В результате построена карта мощности донных отложений и определен их объем, накопившийся в водоеме за период его существования.

Однако, учитывая, что в течение 1989–2000 гг. пульпа Тырнаузского ГОКа могла поступать в исследуемый пруд, мы не можем утверждать, что измеренный объем наносов соответствует периоду аккумуляции с момента существования пруда (с 1989 г.) до года измерений (2020). Невозможно без детальных исследований гранулометрического и геохимического состава отложений в пруду отделить взвесь, отложившуюся в пруду при сбросах

пульпы в период до 2000 г., от наносов, поступивших с площади водосбора. В связи с этим в данной статье мы приводим оценку стока наносов, рассчитанную по результатам измерения мощности донных отложений, для двух периодов: с 1989 по 2020 г. (31 год) и с 2000 по 2020 г. (20 лет).

За пределы водосбора (в водоем в замыкающем створе) рыхлообломочный материал выносятся только при формировании поверхностного стока воды. Поэтому отложения, накопившиеся в пруду, соответствуют той доле рыхлообломочного материала, который был вынесен за пределы водосбора в период существования водоема. Отношение объема рыхлообломочного материала, поступившего в пруд, к общему объему материала, переместившегося в пределах водосбора благодаря проявлению экзогенных процессов, характеризует коэффициент доставки наносов (SDR) для исследуемого водосбора. Он был определен двумя способами.

Во-первых, на основе соотношения между объемами донных наносов в озере Гитче-Гижигит и суммарного объема перемещенного внутри водосбора рыхлообломочного материала за период существования водоема.

Во-вторых, на основе расчета индекса связности потоков наносов (IC) и карты экзогенных процессов. Для этого на основе ЦМР с использованием утилиты SedInConnect 2.3, основанной на алгоритме [Cavalli et al., 2013, Hamel et al., 2015], была построена карта IC для всего водосбора (рис. 3). В качестве входных параметров для расчета сопротивления, оказываемого нанорельефом поверхностному стоку, использован размер скользящего окна размером 5×5 м. Итоговое разрешение модели составило 2,5 м.

Затем был проведен расчет SDR_i по формуле [Vigiak et al., 2012] для каждой i ячейки ЦМР:

$$SDR_i = \frac{SDR_{\max}}{1 + \exp\left(\frac{IC_0 - IC_i}{k}\right)}, \quad (1)$$

где $SDR_{\max}$ – максимальная объемная доля наносов с размерностью песка или мельче (т. е. доступная к транспортировке в фоновых условиях ежегодного снеготаяния или сильных, хотя и не экстраординарных, ливней); IC_0 – базовое значение индекса связности потоков наносов, калибруемый параметр, при значении индекса связности в произвольной точке (см. IC_i ниже), равного IC_0 , из данной ячейки в приемный бассейн доставляется 50% материала. В данной работе принят $IC_0 = 0,5$ [Borselli et al., 2008]; IC_i – переменное значение индекса связности потоков наносов в каждой i -й точке исследуемого водосбора [Cavalli et al., 2013]; k – коэффициент, калибруемый параметр, отвечающий нелинейности

связи между IC_i [Cavalli et al., 2013] и коэффициентом доставки (например, по негидро-геоморфологическим причинам, т. е. не оцениваемым по ЦМР – характер растительности, доля стока, переходящего в подземный, и т. д.). При фиксированных значениях IC_i и высоких значениях k разница в доле доставляемого в приемный бассейн материала будет невелика, а при низких значениях k – части водосбора со значением индекса связности ниже среднего будут практически исключены из сети доставки наносов. При отсутствии оснований полагать непропорциональное влияние IC_i на SDR_i , коэффициент k был принят равным 1.

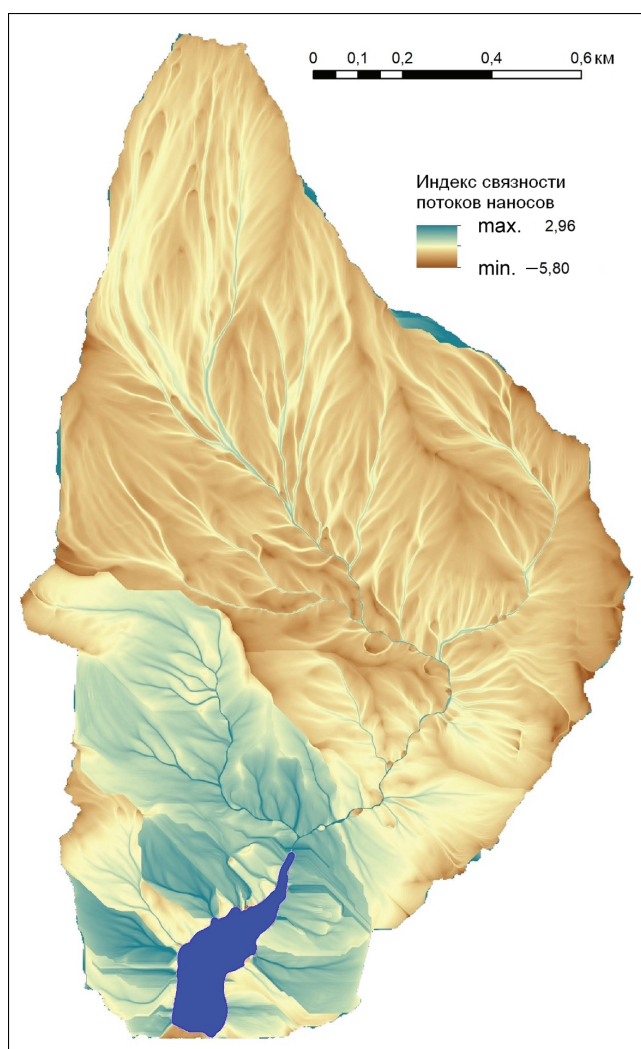


Рис. 3. Карта индекса связности потоков наносов для водосбора оз. Гитче-Гижигит

Fig. 3. Map of the connectivity index for the catchment area of the Gitche-Gizhgit Lake

$SDR_{\max}$ лимитирует расчетные значения доставки исходя из предположения, что наиболее крупные обломки (от гравия / дресвы и крупнее) обычно долгое время остаются неподвижными на склонах. В гор-

ных условиях, при стандартной крутизне около или более угла естественного откоса, размерность обломочных частиц не служит ограничением к транспортировке. SDR_{max} установлен нами на уровне 0,8 (80%), стандартном для моделирования стока наносов в горных условиях [Vigiak et al., 2012].

Далее на основе совмещения карт экзогенных процессов и IC_i были проведены оценки доставки рыхлообломочного материала в пруд Гитче-Гижгит.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Совместная оценка процессов плоскостного смыва и линейных размывов была выполнена для двух временных интервалов в течение года. Они характеризовали периоды с малым количеством осадков, включая, в том числе, и холодное время года (август 2020 – май 2021 г.), и с максимальными слоями дождевых осадков (май – июль 2021 г.) (рис. 4). Выяснилось, что за первый период произошло заполнение сети промоин (см. рис. 4Б), а слой аккумуляции превысил слой денудации на 10% (табл. 2). При этом наблюдалось понижение межпромоинных пространств, которое может быть связано в равной мере с развитием плоскостного смыва и медленным течением грунта за счет температурно-влажностных колебаний. В пользу зна-

чимости именно медленного течения грунта говорит частичное запыление промоин. Небольшое превышение аккумуляции над эрозией можно объяснить поступлением части наносов с вышележащих оголенных участков склонов. В сезон дождей теплого времени года линейное врезание в целом по площади участка существенно преобладало над локальным переотложением наносов (см. табл. 2). Оценки смыва / намыва рыхлообломочного материала, полученные на основе использования метода шпилек, в целом подтверждают выявленные тенденции. Врезание тальвегов составило за год в среднем 1,6 см, а понижение межпромоинных пространств – 0,3 см. Так как два периода наблюдений суммарно охватывают около одного года, можно сделать вывод о годичной динамике процессов перераспределения наносов на лишенном сплошного травяного покрова склоне. Средний слой смыва на исследуемом участке составил за год 1,9 см с явно выраженным пульсационным характером эрозионно-аккумулятивных процессов, по крайней мере за рассматриваемый период. Наиболее интенсивно эрозионные процессы протекали в мае – июле, когда, согласно данным метеорологических наблюдений, наблюдался максимум осадков в течение года, преимущественно ливневого характера.

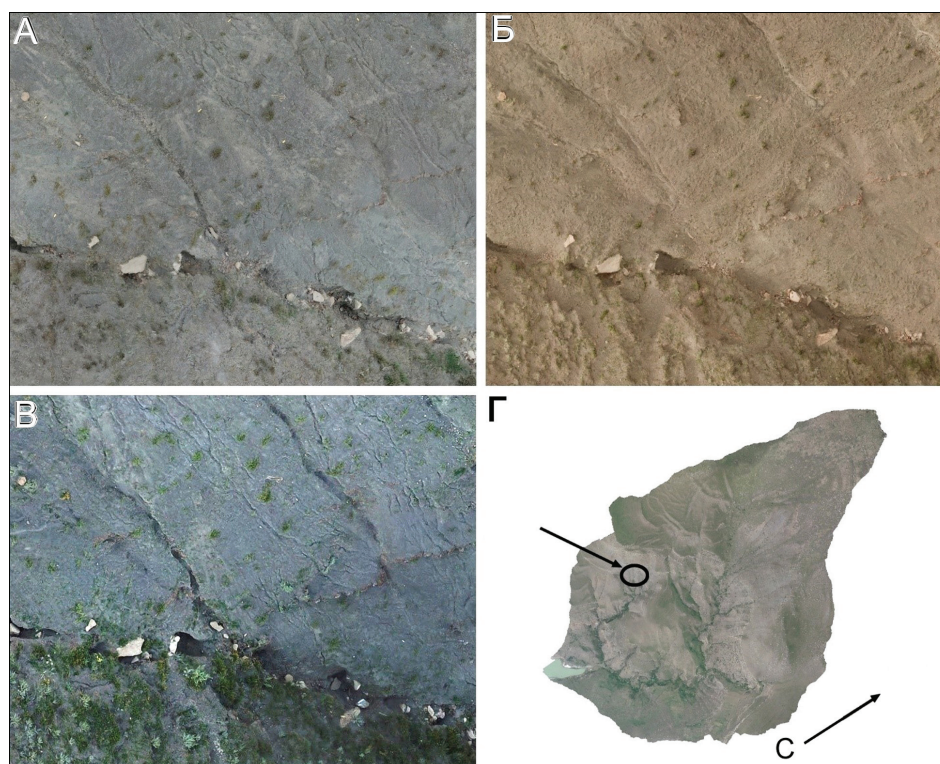


Рис. 4. Фрагмент съемки с использованием БПЛА участка развития плоскостного смыва и промоин для трех временных срезов:

А – август 2020 г.; Б – май 2021 г.; В – июль 2021 г.; Г – расположение участка мониторинга на водосборе Гитче-Гижгит

Fig. 4. A fragment of a UAV survey for the area with sheet and deep rill erosion for three time samples:
А – August 2020; Б – May 2021; В – July 2021; Г – location of the monitoring site at the Gitche-Gizhgit catchment

Таблица 2

Результаты количественных оценок процессов сноса/аккумуляции на участке оголенного склона, полученные на основе сопоставления ЦМР, построенных по результатам крупномасштабной съемки с БПЛА

Интервал	Площадь, м ²	Абсолютная высота, м	Крутизна, градус	Слой сноса*, см	Слой аккумуляции**, см
15.08.2020 – 23.05.2021	1371	1470–1505	40,1 ± 15	–7,6/–4,7	14,1/5,2
23.05–11.07.2021	2296	1476–1512	38 ± 15	–10,3/–3,4	15,3/1

Примечания. *В среднем в зонах сноса/по участку. **В среднем в зонах аккумуляции/по участку.

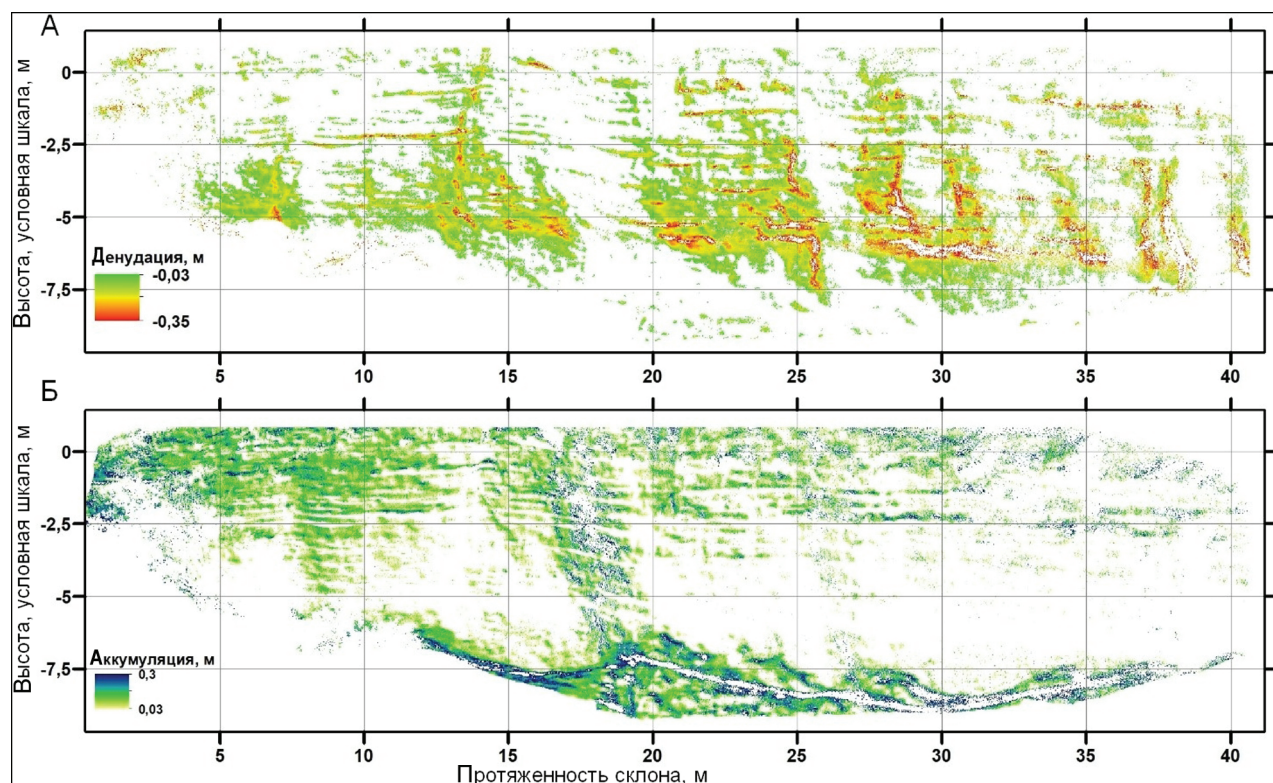


Рис. 5. Результаты мониторинга трансформации поверхности скальной стенки в связи с развитием обвально-осыпных процессов за период август 2020 – июль 2021 г.: А – скорости денудации; Б – скорости аккумуляции

Fig. 5. The monitoring results for the transformation of a rock wall surface due to rockfall processes during August 2020 – July 2021: А – denudation rate; Б – accumulation rate

Темпы обвально-осыпных процессов оценивались на отвесной скальной стенке борта овражного вреза, открывающегося непосредственно в котловину пруда. В результате установлено, что на участках максимального отступления скальной стенки (примерно 10% ее общей площади) средний темп составил 11 см за год, а при усреднении на всю площадь – 1,3 см. Участки аккумуляции рыхлого материала были выявлены в отдельных трещинах в верхней части стенки и у ее основания (рис. 5). Следует учитывать, что часть материала, переотложившегося в трещинах и у основания стенки, поступила за счет обрушения рыхлообломочной толщи, смещающейся по склону, расположенному над скальной стенкой.

Медленные массовые смещения рыхлого грунта или крип, как правило, не поставляют наносы непосредственно в постоянные водотоки, они перемещают их в пределах водосбора на очень короткие расстояния за счет температурно-влажностных колебаний и на границе с участками развития обвально-осыпных процессов и линейной эрозии «передают» этим процессам перемещаемый материал. Тем самым перемещаемый при крипе материал в итоге частично вовлекается в дальнейший перенос временными водотоками, образующимися при выпадении стокоформирующих ливней. По результатам исследований на плато Бийчесын, расположенном в том же высотном поясе Большого Кавказа в 55 км к западу от исследуемого водосбора, установлено, что сред-

немноголетние вертикальные скорости крипа изменяются в интервале 0,94–2,86 мм/год [Ажигиров, Голосов, 1990] со средним значением 1,92 мм/год. Следует учитывать, что средние абсолютные высоты плато Бийчесын составляют 1700–1800 мм, что примерно на 300–400 м выше, чем абсолютные высоты водосбора Гитче-Гижгит, из-за чего там чаще повторяемость дней с внутрисуточными переходами температуры через 0°C. Именно благодаря процессам замерзания-оттаивания наряду с колебаниями влажности происходит смещение грунта при крипе. Поэтому для дальнейших расчетов использовались темпы крипа 1,5 мм/год. Данная величина соответствует и средним значениям темпов крипа для залуженных склонов других горных стран и возвышенностей [Anderson, Cox, 1978; Ажигиров, Голосов, 1990].

Характерные скорости обвального-осыпных процессов в средне- и высокогорье Кавказа оцениваются в среднем не более 3 мм/год [Харченко и др., 2021]. При этом речь идет о скорости отступления стенки по нормали к ней, поскольку вертикальную скорость оценить проблематично. Для различных частей Европейских Альп скорости отступления скальных стенок, сложенных осадочными породами, составила в среднем 0,2–0,7 мм/год [Sass, 2007], тогда как для Южных Альп в Новой Зеландии они составили 0,08–1,33 мм/год [Hales, Roering, 2005]. Несколько выше скорости обвального-осыпных процессов на Шпицбергене, где они достигают 0,33–1,96 мм/год [Siewert et al., 2012]. Приводимые величины наряду с результатами выполненных наблюдений на исследуемом водосборе позволяют принять скорости отступления скальных стенок равными темпам крипа.

Достаточно сложно оценить среднемноголетние скорости плоскостного смыва, так как они сильно варьируют в зависимости от длины склонов (или удельной площади водосбора для каждой точки), крутизны вышележащей поверхности, проективного покрытия почвы травянистым покровом и интенсивности осадков. На Западном Кавказе (бассейн р. Бзугу), где выпадает до 1500 мм/год, скорости плоскостного смыва находятся в интервале 0,7–2,1 мм/год [Ажигиров, 1991]. Для степных склонов крутизной 20° в Байкальской впадине установлены средние скорости делювиального смыва 1 мм/год, при крутизне 40° средние скорости составляли уже 7,3 мм/год [Агафонов, 1985]. В обоих случаях длина склонов была порядка 300 м. На водосборе Гитче-Гижгита средняя крутизна оголенных участков – 30°, в то же время в силу вытянутости водосбора средняя длина склонов составляет не более 100 м, поэтому, вероятно, меньшее значение более приближено к истине. Характерные скорости плоскостного смыва, по всей видимости, распределены

по площади водосбора экспоненциально. Примерное значение средней геометрической скорости этого процесса для низкогорно-среднегорных условий и почти сведенным растительным покровом были оценены нами в 1–2 мм/год (в расчетах использовано значение 1,5 мм/год).

В то же время в уже выработанных долинах, а не на размываемых склонах, скорости продолжающейся линейной эрозии составляют порядка 0,5 мм/год [Хрисанов, 1979]. В качестве среднемноголетней скорости линейной эрозии для водосбора Гитче-Гижгит принята величина в 1 мм/год.

С учетом площади распространения (см. табл. 1) и среднегодовых темпов каждого из ведущих экзогенных процессов суммарный объем перемещаемого внутри водосбора материала оценивается в 5730 м³/год, или 14 235 т/год. При этом суммарное накопление наносов в озере Гитче-Гижгит за время его существования составило 16 055 м³, что соответствует среднегодовому стоку наносов 946 т/год с 95%-м доверительным интервалом (458; 1543) (в зависимости от плотности отложений и с учетом некоторой неопределенности вклада взвешенных наносов, поступавших в водоем при сбросе пульпы). Таким образом, порядка только 3,2–10,8% рыхлообломочного материала выносятся при формировании поверхностного стока на водосборе за его пределы.

С учетом пространственного распределения ИС и экзогенных процессов по площади водосбора суммарный годовой объем наносов, который выносятся за пределы водосбора, составляет около 240–250 м³, что соответствует среднегодовому слою денудации – 0,16 мм. При этом вклад основных экзогенных процессов следующий: обвальное-осыпные процессы – 40, линейная эрозия – 36, крип – 108, плоскостной смыв – ~62 м³/год. При средней плотности доломитов, известняков, песчаников и алевролитов, слагающих водосбор, около 2,5 т/м³, 600–650 т/год рыхлого вещества выносятся временными водотоками в озеро Гитче-Гижгит с площади водосбора чуть больше 1,5 км², что соответствует $SDR = 4\%$.

Таким образом, полученные двумя методами оценки SDR в целом близки, что позволяет утверждать, что только незначительная часть продуктов денудации выносятся за его пределы в постоянные водотоки, а большая их часть переоткладывается внутри водосбора. При этом только темпы обвального-осыпных процессов характеризуют современные скорости выветривания коренных пород, которые как минимум в пять раз превышают среднегодовые темпы денудации водосбора. Необходимо иметь данные о скоростях выветривания коренных пород, перекрытых рыхлым чехлом для оценки современных трендов накопления рыхлообломочного материала на водосборе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Фактические данные об объемах аккумуляции наносов в озере Гитче-Гижгит и низкие значения коэффициентов доставки наносов, указывающие на переотложение большей части перемещаемого экзогенными процессами рыхлообломочного материала внутри водосбора, подтверждаются и внешним обликом дна основной долины водосбора, по которой происходит транспорт наносов, поступающих в водоем. В днище основной долины водосбора на всем его протяжении прослеживается слабоврезанное русло временного водотока, встречаются древесная и кустарниковая растительность без каких-либо следов воздействия на нее мощного стока. Только на участке впадения в днище основной долины первого от озера правобережного притока сформирован конус выноса, на котором заметны следы относительно свежих наносов. Это подтверждает расчеты, согласно которым относительно высокая связность потоков наносов наблюдается только в нижней части водосбора (см. рис. 3). Анализ изменений эрозионного потенциала осадков (ЭПО) указывает на отсутствие какого-ли-

бо выраженного тренда его изменений за последние 65 лет (рис. 6). Это позволяет предположить, что темпы денудации оставались на выявленном нами уровне и в период с 1958 г., хотя нельзя исключать, что пастбищная нагрузка на водосбор в период до 1991 г. была выше. Это могло стимулировать более высокие темпы плоскостного смыва и ручейковой эрозии в этот период.

Только единичная встречаемость оползневых тел и отсутствие оползней-сплывов указывает на отсутствие в настоящее время условий для их формирования на водосборе Гитче-Гижгит. Важным ограничением для более широкого распространения оползней на склонах является малая мощность рыхлого чехла и ступенчатый профиль склонов, способствующий переотложению смываемых поверхностным стоком наносов на участках выполаживания склонов. В районах Кавказа с субтропическим климатом и высокой сейсмической активностью, где процессы выветривания коренных пород идут более интенсивно, формирование оползней способствует высоким значениям денудации [Ажигиров, 1991].

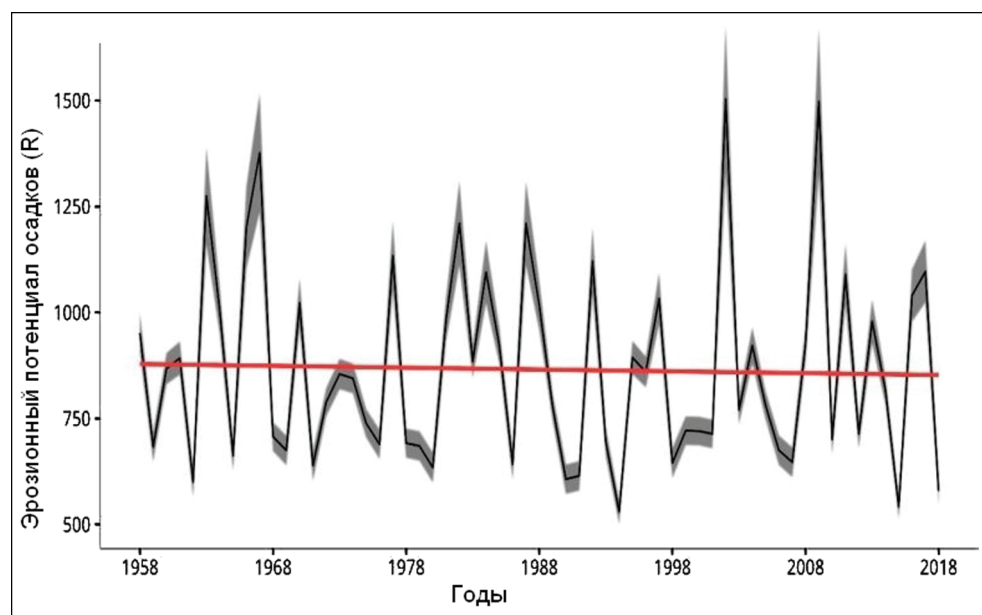


Рис. 6. Изменения эрозионного потенциала осадков за период с 1958 г. по данным реанализа TerraClimate [Abatzoglou et al., 2018]. Горизонтальная линия – линейный тренд

Fig. 6. Changes in the erosion index of precipitation since 1958 for the studied area according to TerraClimate reanalysis (Abatzoglou et al., 2018). The horizontal line shows a linear trend

Доля рыхлообломочного материала, выносимого с различных частей водосбора, во многом зависит от взаиморасположения отдельных элементов склонов и наличия ловушек наносов по пути их транспортировки. Наличие аструктурных участков и ступенчатый продольный профиль склонов в пределах междуречных пространств водосбора Гит-

че-Гижгит, снижающих степень связности потоков наносов, позволяет отнести его к числу водосборов с высокой долей переотложения наносов, несмотря на достаточно высокие уклоны склонов.

Показателем темпов денудации на водосборах среднегорного пояса за длительные интервалы времени служат данные о скоростях аккумуляции

в озерных котловинах с относительно малыми площадями водосборов. Анализ количественных оценок темпов накопления донных отложений в малых озерах среднегорного пояса в горах европейского континента свидетельствует об их некотором росте в последние десятилетия по сравнению с серединой XIX в. [Rose et al., 2011]. Тем не менее в целом скорости отложения наносов для озер среднегорного пояса гор Европы в среднем даже ниже, чем на озере Гитче-Гижгит. Это указывает на малые темпы денудации на их водосборах или же, как в данном случае, переотложении значительной части перемещаемого склоновыми процессами материала внутри водосборов. Установленный модуль стока наносов для водосбора Гитче-Гижгит составил 514 т/(год·км²) (95% доверительный интервал 249; 839), что соизмеримо со средними значениями денудации для малых речных бассейнов европейских Альп ($F < 500$ км²), сложенных осадочными породами. Они для южных и северных Альп составляют 557 и 465 т/(год·км²) соответственно [Hinderer et al., 2013]. В тоже время темпы выноса материала на водосборе пруда Поповского, имеющего сопоставимую с водосбором пруда Гитче-Гижгит площадь и расположенного в центре Среднерусской возвышенности, в период его значительной распашки (1963–1986) составляли более 1,7 мм/год [Голосов и др., 2020]. Тем самым они более чем на порядок превышали объемы выноса с исследованного водосбора, что является

иллюстрацией значительного влияния антропогенного воздействия на темпы преобразования рельефа экзогенными процессами.

ВЫВОДЫ

Выполненные двумя независимыми методами оценки коэффициента доставки наносов для малого водосбора Гитче-Гижгит оказались сопоставимыми друг с другом и позволили оценить его в 3–10%. Тем самым подтверждается правомерность использования каждого из подходов. Среднегодовые темпы денудации водосбора составили 0,16 мм/год. Более 40% ежегодно перемещаемого внутри водосбора материала связано с протеканием процессов медленного течения грунта (крипа). Значительный объем внутрисклоновой аккумуляции обусловлен морфоструктурными особенностями водосбора и низким антропогенным воздействием на его склоны, а также отсутствием, по крайней мере, внутри исследованного периода экстремальных эрозионных событий, максимальный вклад которых в суммарную денудацию характерен для всех высотных поясов гор. Выявлена сезонность в развитии процессов водной эрозии на склонах с максимумом, приходящимся на июнь – июль, когда выпадает наибольший слой осадков. Установлено, что модуль стока наносов, составивший для исследованного водосбора 514 т/(год·км²) в целом близок по величине модулям стока наносов малых рек среднегорного пояса Альп (465–557 т/(год·км²)).

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-17-00181 (полевые работы, разделы «Введение», «Материалы и методы исследований», «Результаты исследований») и в рамках государственного задания НИЛЭПиРП географического ф-та МГУ (проект № 121051100166-4) (раздел «Обсуждение результатов»). Для подготовки статьи использованы космические снимки, полученные от Центра коллективного пользования МГУ «Геопортал» в кон- курсе научных проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агафонов Б.П. Плоскостная эрозия в Байкальской впадине // Геоморфология. 1985. № 3. С. 29–36.
- Ажигиров А.А. О роли различных денудационных процессов в развитии склонов на северо-западном Кавказе // Геоморфология. 1991. № 2. С. 46–51.
- Ажигиров А.А., Голосов В.Н. Оценка медленных смещений почвенно-грунтовых масс при инженерно-географических исследованиях // Геоморфология. 1990. № 1. С. 33–39.
- Геология СССР. Т. IX: Северный Кавказ. Ч. 1: Геологическое описание / под ред. В.Л. Андрушук и др. М.: Недра, 1968. 760 с.
- Голосов В.Н., Кумани М.В., Иванова Н.Н., Беляев В.Р., Шамигурина Е.Н. Заиление малого водохранилища в условиях климатических изменений и урбанизации водосбора (Поповский пруд, г. Курск) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1. 2020. № 6. С. 51–62.
- Харченко С.В., Федин А.В., Голосов В.Н. Темпы денудации в перигляциальных областях высокогорий: методы и результаты исследований // Геоморфология. 2021. Т. 52. № 1. С. 3–18.
- Хрисанов В.А. Масштабы современной денудации на Кавказе (на примере Северной Осетии) // Геоморфология. 1979. № 4. С. 81–85.
- Abatzoglou J.T., Dobrowski S.Z., Parks S.A., Hegewisch K.C. TerraClimate, a High-Resolution Global Dataset of Monthly Climate and Climatic Water Balance from 1958–2015, *Scientific Data*, 2018, vol. 5, no. 1, 170191, DOI: 10.1038/sdata.2017.191.
- Anderson E.W., Cox N.J. A comparison of different instruments for measuring soil creep, *Catena*, 1978, vol. 5, no. 2, p. 81–93.
- Borselli L., Cassi P., Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field nu-

- merical assessment, *Catena*, 2008, vol. 75(3), p. 268–277, DOI: 10.1016/j.catena.2008.07.006.
- Bracken L.J., Turnbull L., Wainwright J., Bogaart P. Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transfer at multiple scales, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, vol. 40, no. 2, p. 177–188, DOI: 10.1002/esp.3635.
- Cantreul V., Bièdiers C., Calsamiglia A., Degré A. How pixel size affects a sediment connectivity index in central Belgium, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, vol. 43, no. 4, p. 884–893, DOI: 10.1002/esp.4295.
- Cavalli M., Trevisani S., Comiti F., Marchi L. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments, *Geomorphology*, 2013, vol. 188, p. 31–41, DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.05.007.
- Gitelson A.A., Kaufman Y.J., Stark R., Rundquist D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction, *Remote Sens. Environ.*, 2002, vol. 80, p. 76–87.
- Hales T.C., Roering J.J. Climate-controlled variations in scree production, Southern Alps, New Zealand, *Geology*, 2005, vol. 33, no. 9, p. 701–704.
- Hamel P., Chaplin-Kramer R., Sim S., Mueller C. A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA, *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 524, p. 166–177.
- Haregeweyn N., Poesen J., Nyssen J., Govers G., Verstraeten G., Vente de J., Deckers J., Moeyersons J., Haile M. Sediment yield variability in Northern Ethiopia: a quantitative analysis of its controlling factors, *Catena*, 2008, vol. 75, no. 1, p. 65–76.
- Hendrickx H., Sloover de L., Stal C., Delaloye R., Nyssen J., Frankl A. Talus slope geomorphology investigated at multiple time scales from high-resolution topographic surveys and historical aerial photographs (Sanetsch Pass, Switzerland), *Earth Surf Process Landforms*, 2020, vol. 45, p. 3653–3669.
- 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.
- Kirchner J.W., Finkel R.C., Riebe C.S., Granger D.E., Clayton J.L., King J.G., Megahan W.F. Mountain erosion over 10 yr, 10 k.y., and 10 m.y. time scales, *Geology*, 2001, vol. 29, p. 591–594, DOI: 10.1130/0091-7613(2001)0292.0.CO;2.
- Messenzehl K., Hoffmann T., Dikau R. Sediment connectivity in the high-alpine valley of Val Mütsch, Swiss National Park – linking geomorphic field mapping with geomorphometric modelling, *Geomorphology*, 2014, vol. 221, p. 215–229.
- Pawlik Ł., Šamonil P. Soil creep: the driving factors, evidence and significance for biogeomorphic and pedogenic domains and systems—a critical literature review, *Earth-Science Reviews*, 2018, vol. 178, p. 257–278.
- Rose N.L., Morley D., Appleby P.G., Battarbee R.W., Alilksaar T., Guilizzoni P., Jeppesen E., Korhola A., Punning J.-M. Sediment accumulation rates in European lakes since AD 1850: trends, reference conditions and exceedence, *Journal Paleolimnol.*, 2011, vol. 45, p. 447–468, DOI: 10.1007/s10933-010-9424-6.
- Sass O. Bedrock detection and talus thickness assessment in the European Alps using geophysical methods, *Journal of Applied Geophysics*, 2007, vol. 62, p. 254–269.
- Siewert M.B., Krautblatter M., Christiansen H.H., Eckerstorfer M. Arctic rockwall retreat rates estimated using laboratory-calibrated ERT measurements of talus cones in Longyear-dalen, Svalbard, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, vol. 37, p. 1542–1555, DOI: 10.1002/esp.3297.
- Sougnès N., Wesemael van B., Vanacker V. Low erosion rates measured for steep, sparsely vegetated catchments in southeast Spain, *Catena*, 2011, vol. 84, no. 1–2, p. 1–11, DOI: 10.1016/j.catena.2010.08.010.
- Vente de J., Poesen J., Arabkhedri M., Verstraeten G. The sediment delivery problem revisited, *Prog. Phys. Geogr.*, 2007, vol. 31, no. 2, p. 155–178.
- Vigiak O., Borselli L., Newham L.T.H., McInnes J., Roberts A.M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio, *Geomorphology*, 2012, vol. 138, no. 1, p. 74–88.
- Wood S.N. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models, *Journal of the Royal Statistical Society (B)*, 2011, vol. 73, no. 1, p. 3–36.
- Wood S.N., Bravington M.V., Hedley Sh.L. Soap Film Smoothing, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Statistical Methodology)*, 2008, vol. 70, no. 5, p. 931–955, DOI: 10.1111/j.1467-9868.2008.00665.x.

Поступила в редакцию 25.06.2022

После доработки 10.11.2022

Принята к публикации 01.12.2022

RATES OF MODERN DENUDATION OF A SMALL CATCHMENT IN THE MIDDLE MOUNTAIN BELT OF THE GREATER CAUCASUS (CASE STUDY OF THE GITCHE-GIZHGIT CATCHMENT)

S.V. Kharchenko¹, V.N. Golosov², A.S. Tsyplenkov³, A.V. Fedin⁴, M.I. Uspensky⁵

^{1-3,5} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

^{1,2,4} Russian Academy of Sciences, Institute of Geography, Laboratory of Geomorphology

² Kazan Federal University, Institute of Ecology and Nature Management

¹ Department of Geomorphology and Paleogeography, Senior Scientific Researcher,
Ph.D. in Geography; e-mail: xar4enkoff@yandex.ru

² Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher,
D.Sc. in Geography; e-mail: golosov@gmail.com

³ Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher,
Ph.D. in Geography; e-mail: atsyplenkov@gmail.com

⁴ Laboratory of Geomorphology, Ph.D. student; e-mail: fedinanton@mail.ru

⁵ Department of Geomorphology and Paleogeography, master student;
e-mail: kizyalleski@gmail.com

The volumes of loose-clastic material moved by modern earth surface processes were quantified for a small mid-mountain catchment area ($F = 1,86 \text{ km}^2$), located in the Baksan River basin using a number of independent methods (modeling of erosion and geomorphologic mapping). The total volume of removed material was estimated through the assessment of the thickness of bottom sediments accumulated in a reservoir located in the outlet section of the catchment area. The rates of linear and rill erosion have been found using the results of repeated UAV surveys and the pin method. The rates of rockfall processes are estimated on the basis of repeated ground-based laser scanning. Additionally, published data on the rates of earth surface processes in the mountains were used. Based on the results of field mapping and interpretation of space images, a map of the spatial pattern of leading earth surface processes was compiled. A digital terrain model of the catchment was constructed on the basis of detailed UAV survey. The volume of loose clastic material delivered to the reservoir was estimated using data on the average annual rates of leading earth surface processes, a map of their distribution over the catchment area, and the connectivity index. It has been established that the average annual denudation rate within the catchment area is 0,16 mm/year. At the same time, only about 3–10% of the products of denudation are delivered to the reservoir. The sediment yield, calculated on the basis of the volume of sediments in the reservoir, is 514 t/km² per year. It is comparable to the sediment yield of small rivers draining the mid-mountain belt of the Alps with similar bedrock lithology, which was calculated using the results of long-term observations of water and sediment discharge at gauging stations.

Keywords: denudation, UAV, laser scanning, connectivity of sediment flow, sediment delivery coefficient, bottom sediments

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 19-17-00181, field survey, Object of the Study, Methods and Results sections). The Discussion section was prepared under the State task of the Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, MSU Faculty of Geography (project 121051100166-4). Space imagery for the paper preparation were acquired from the Geoportal Resource Sharing Center under the research projects competition.

REFERENCES

- Abatzoglou J.T., Dobrowski S.Z., Parks S.A., Hegewisch K.C. TerraClimate, a High-Resolution Global Dataset of Monthly Climate and Climatic Water Balance from 1958–2015, Scientific Data, vol. 5, no. 1, 170191, DOI: 10.1038/sdata.2017.191.
- Agafonov B.P. Ploskostnaya eroziya v Baikalskoi vpadine [Sheet Erosion in the Baikal Depression], *Geomorfologiya*, 1985, no. 3, p. 29–36. (In Russian)
- Anderson E.W., Cox N.J. A comparison of different instruments for measuring soil creep, *Catena*, 1978, vol. 5, no. 2, p. 81–93.
- Azhigirov A.A. O roli razlichnykh denudatsionnykh protsessov v razvitiy sklonov na severo-zapadnom Kavkaze [On the significance of various erosion processes in slope evolution at the NW Caucasus], *Geomorfologiya*, 1991, no. 2, p. 46–51. (In Russian)
- Azhigirov A.A., Golosov V.N. Otsenka medlennykh smeshchenii pochvenno-gruntovykh mass pri inzhenerno-geograficheskikh issledovaniyakh [Slow mass movement assessment in engineering-geographical studies], *Geomorfologiya*, 1990, no. 1, p. 33–39. (In Russian)
- Borselli L., Cassi P., Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment, *Catena*, 2008, no. 75(3), p. 268–277, DOI: 10.1016/j.catena.2008.07.006.
- Bracken L.J., Turnbull L., Wainwright J., Bogaart P. Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transfer at multiple scales, *Earth Surface Processes*

- and *Landforms*, 2015, vol. 40, no. 2, p. 177–188, DOI: 10.1002/esp.3635.
- Cantreul V., Bielders C., Calsamiglia A., Degré A. How pixel size affects a sediment connectivity index in central Belgium, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, vol. 43, no. 4, p. 884–893, DOI: 10.1002/esp.4295.
- Cavalli M., Trevisani S., Comiti F., Marchi L. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments, *Geomorphology*, 2013, vol. 188, p. 31–41, DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.05.007.
- Geologiya SSSR, t. IX, Severnyi Kavkaz, ch. 1, Geologicheskoe opisanie* [Geology of USSR, vol. IX, Northern Caucasus, pt. 1, Geological Characteristic], V.L. Andrushchuk et al. [eds.], Moscow, Nedra Publ., 1968, 760 p. (In Russian)
- Gitelson A.A., Kaufman Y.J., Stark R., Rundquist D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction, *Remote Sens. Environ.*, 2002, vol. 80, p. 76–87.
- Golosov V.N., Kumani M.V., Ivanova N.N., Belyaev V.R., Shamshurina E.N. Zailenie malogo vodokhranilishcha v usloviyakh klimaticheskikh izmenenii i urbanizatsii vodosbora (Popovskii prud, g. Kursk) [Siltation of a small reservoir under climatic changes and urbanization of its catchment basin (the Popovsky pond, Kursk)], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 6, p. 51–62. (In Russian)
- Hales T.C., Roering J.J. Climate-controlled variations in scree production, Southern Alps, New Zealand, *Geology*, 2005, vol. 33, no. 9, p. 701–704.
- Hamel P., Chaplin-Kramer R., Sim S., Mueller C. A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA, *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 524, p. 166–177.
- Haregeweyn N., Poesen J., Nyssen J., Govers G., Verstraeten G., Vente de J., Deckers J., Moeyersons J., Haile M. Sediment yield variability in Northern Ethiopia: a quantitative analysis of its controlling factors, *Catena*, 2008, vol. 75, no. 1, p. 65–76.
- Hendrickx H., Sloover de L., Stal C., Delaloye R., Nyssen J., Frankl A. Talus slope geomorphology investigated at multiple time scales from high-resolution topographic surveys and historical aerial photographs (Sanetsch Pass, Switzerland), *Earth Surf Process Landforms*, 2020, vol. 45, p. 3653–3669.
- 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.
- Kharchenko S.V., Fedin A.V., Golosov V.N. Tempy denudatsii v periglyatsial'nykh oblastyakh vysokogorii: metody i rezul'taty issledovaniy [Denudation rates in the mountain periglacial regions: research methods and results], *Geomorfologiya*, 2021, vol. 52, no. 1, p. 3–18. (In Russian)
- Khrisanov V.A. Masshtaby sovremennoi denudatsii na Kavkaze (na primere Severnoi Osetii) [The extent of present-day denudation in the Caucasus (case study of Northern Osetia)], *Geomorfologiya*, 1979, no. 4, p. 81–85. (In Russian)
- Kirchner J.W., Finkel R.C., Riebe C.S., Granger D.E., Clayton J.L., King J.G., Megahan W.F. Mountain erosion over 10 yr, 10 k.y., and 10 m.y. time scales, *Geology*, 2001, vol. 29, p. 591–594, DOI: 10.1130/0091-7613(2001)0292.0.CO;2.
- Messenzehl K., Hoffmann T., Dikau R. Sediment connectivity in the high-alpine valley of Val Mütschuns, Swiss National Park – linking geomorphic field mapping with geomorphometric modelling, *Geomorphology*, 2014, vol. 221, p. 215–229.
- Pawlik Ł., Samonil P. Soil creep: the driving factors, evidence and significance for biogeomorphic and pedogenic domains and systems – a critical literature review, *Earth-Science Reviews*, 2018, vol. 178, p. 257–278.
- 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, *Journal Paleolimnol.*, 2011, vol. 45, p. 447–468, DOI: 10.1007/s10933-010-9424-6.
- Sass O. Bedrock detection and talus thickness assessment in the European Alps using geophysical methods, *Journal of Applied Geophysics*, 2007, vol. 62, p. 254–269.
- Siewert M.B., Krautblatter M., Christiansen H.H., Eckerstorfer M. Arctic rockwall retreat rates estimated using laboratory-calibrated ERT measurements of talus cones in Longyearfjorden, Svalbard, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, vol. 37, p. 1542–1555, DOI: 10.1002/esp.3297.
- Sougnéz N., Wesemael van B., Vanacker V. Low erosion rates measured for steep, sparsely vegetated catchments in southeast Spain, *Catena*, 2011, vol. 84, no. 1–2, p. 1–11, DOI: 10.1016/j.catena.2010.08.010.
- Vente de J., Poesen J., Arabkhedri M., Verstraeten G. The sediment delivery problem revisited, *Prog. Phys. Geogr.*, 2007, vol. 31, no. 2, p. 155–178.
- Vigiak O., Borselli L., Newham L.T.H., McInnes J., Roberts A.M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio, *Geomorphology*, 2012, vol. 138, no. 1, p. 74–88.
- Wood S.N. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models, *Journal of the Royal Statistical Society (B)*, 2011, vol. 73, no. 1, p. 3–36.
- Wood S.N., Bravington M.V., Hedley Sh.L. Soap Film Smoothing, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Statistical Methodology)*, 2008, vol. 70, no. 5, p. 931–955, DOI: 10.1111/j.1467-9868.2008.00665.x.

Received 25.06.2022

Revised 10.11.2022

Accepted 01.12.2022