

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.4.042

СОВРЕМЕННАЯ ДЕНУДАЦИЯ В ГОРАХ И ЕЕ ВКЛАД В ГЛОБАЛЬНУЮ ДЕНУДАЦИЮ СУШИ

© 2021 г. А. М. Грачев^{а, *}, В. Н. Голосов^{а, б, **}

^аИнститут географии РАН, Москва, Россия

^бГеографический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: agrachev@igras.ru

**e-mail: golossov@gmail.com

Поступила в редакцию 27.03.2020 г.

После доработки 09.06.2020 г.

Принята к публикации 30.10.2020 г.

Повышенное внимание к количественной оценке современной денудации горных стран обусловлено значимостью преобразования рельефа в пределах данных территорий и ключевой ролью материала, формирующегося в процессе денудации гор, в суммарном объеме наносов, перемещаемых с суши в Мировой океан. Значительный прогресс, прежде всего, дистанционных методов изучения темпов отдельных экзогенных процессов и денудации в целом, произошедший за последние десятилетия благодаря существенному увеличению точности создаваемых на их основе цифровых моделей рельефа и упрощению обработки полученной информации, способствовал существенному росту количественных данных о динамике преобразования рельефа. В статье обобщены опубликованные результаты и систематизированы методы изучения современной денудации суши. Показано, что совместное использование набора методов прямых наблюдений и дистанционных методов позволяет наиболее детально характеризовать пространственно-временные изменения рельефа при различных масштабах исследований. Порядка 52% продуктов денудации на суше формируется на склонах с уклонами >15%. Для остальных территорий в горах темпы денудации определяются различным сочетанием набора факторов (сейсмотектоническая активность, метеорологические характеристики, литология и антропогенная нагрузка), максимальный совокупный эффект которых достигается в бассейнах малых рек. Так, именно благодаря оптимальному сочетанию перечисленных факторов чуть менее одной трети (6.8 млрд т) от суммарного объема наносов, поступающих с суши в Мировой океан, формируется за счет стока наносов малых и средних рек западного сектора Тихоокеанского огненного пояса.

Ключевые слова: горы, денудация, количественные методы, сток наносов

DOI: 10.31857/S2587556621010052

ВВЕДЕНИЕ

Оценка современных темпов денудации является важнейшей задачей геоморфологии. В частности, ее решение для горных стран имеет также и важное прикладное значение, так как позволяет более точно рассчитывать темпы заиливания водохранилищ, ирригационных систем, определять вероятность формирования селей и определять затраты на сооружение транспортных коммуникаций. Еще до середины прошлого века, за редким исключением (например [14, 18]), отсутствовали методы и подходы, позволяющие на количественной основе судить об интенсивности отдельных экзогенных процессов и денудации в целом [26]. Начиная с 1950-х годов, благодаря работам С.С. Соболева [11], А. Страллера [42, 43], Н.И. Маккавеева [8] и других исследователей, по-

лучили развитие методы, позволяющие определять интенсивность денудационных процессов.

Классическим индикатором для оценки темпов денудации в речном бассейне служит объем стока взвешенных наносов. В этом случае редко учитывается сток влекомых наносов реки, так как до сих пор точность его определения невысока, что приводит к занижению фактического денудационного среза. Денудация в бассейне реки формируется за счет бассейновой (площадной) и русловой (речной) составляющих [10, 12]. В этой связи важно выявить самостоятельный вклад каждой из составляющих в сток наносов рек, а также оценить долю перемещаемого материала, отложившегося по пути транспортировки со склонов в постоянные водотоки и далее собственно в днищах речных долин. Это связано с тем, что полный баланс наносов не равен только лишь речному выносу [2,

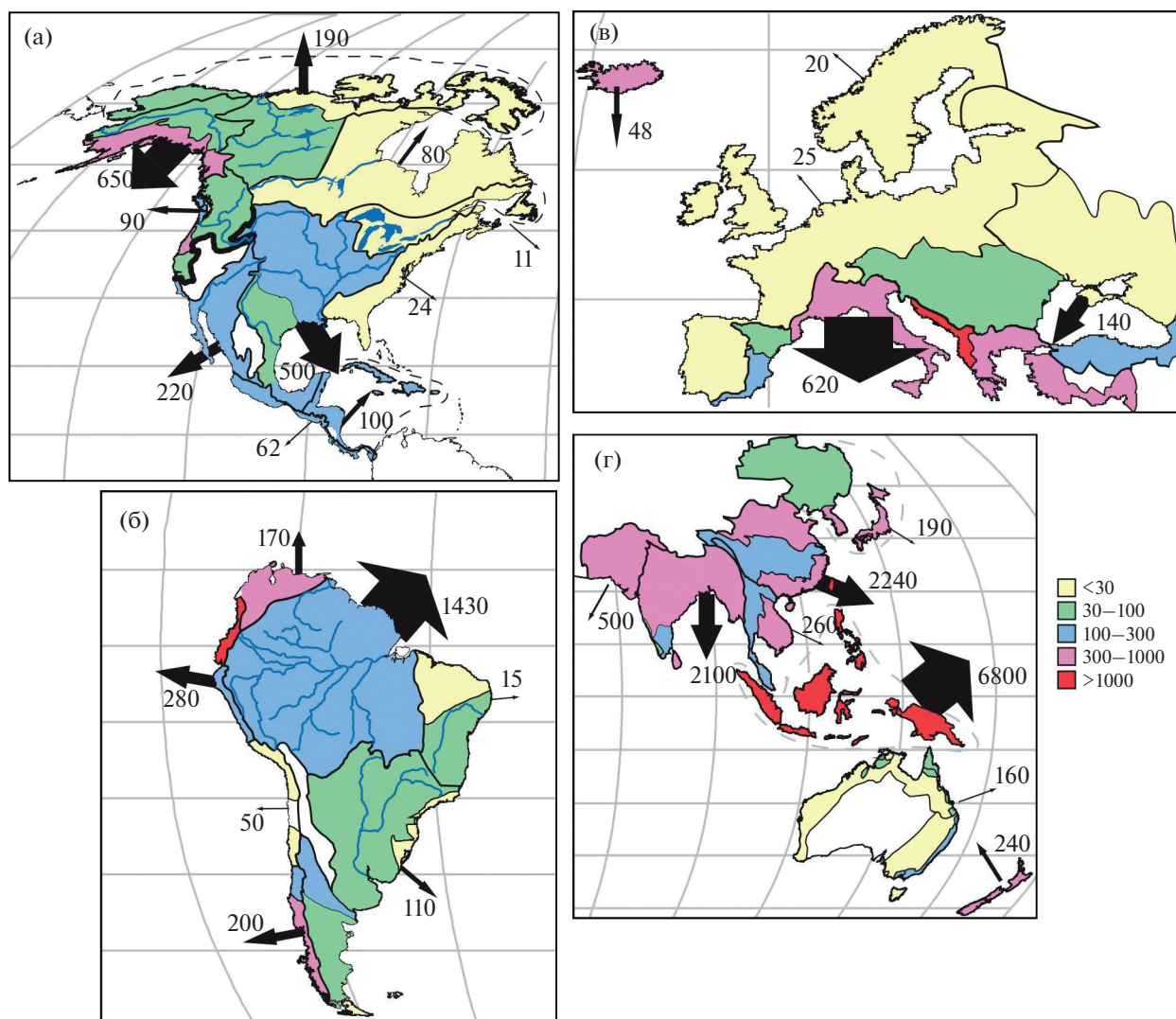


Рис. 1. Пространственная неоднородность стока наносов в глобальном масштабе (из [36]). Цифры со стрелками показывают общий сток наносов (млн т/год), цветом показаны темпы денудации (т/км²/год).
Примечание. Используется с официального разрешения издательства.

8 и др.], а включает также наносы, переотложившиеся на склонах, в конусах выноса, шлейфах, днищах сухих долин, на речных поймах, а также в водоемах [4, 12]. Направление исследований, связанное с оценкой перераспределения наносов в различных звеньях флювиальной сети, начиная со ставших классическими работ Н.И. Маккавеева [8, 9], продолжает развиваться в нашей стране на передовом уровне [5, 12, 20].

Ранее выполненные глобальные оценки темпов денудации и выноса материала с суши в Мировой океан в своей основе также базируются на данных мониторинга стока наносов рек и их экстраполяции на неохваченные наблюдениями территории [7, 33, 34, 36, 39, 46 и др.]. Они свидетель-

ствуют о высокой пространственной неравномерности выноса материала в Мировой океан с разных континентов и их частей (рис. 1). Причем значительная доля суммарного выноса приходится на малые горные реки Тихоокеанского пояса, водосборы которых располагаются в сейсмически активных районах, с максимумом, расположенным в юго-восточной Азии, где наблюдается значительное антропогенное воздействие на речные бассейны на фоне высокого слоя осадков [17, 35, 36].

В данной работе обобщены методы исследования современной денудации и рассмотрен вклад денудации горных территорий в глобальную денудацию суши, оцененный на основе анализа опубликованных данных.

Таблица 1. Применение различных методов оценки современной денудации в горах в разномасштабных исследованиях*

Метод	Локальная денудация			Региональная денудация	
	точечная оценка	склон	малый водосбор	речной бассейн	горная страна
Методы прямых наблюдений (мониторинг и датировки)					
Шпильки, репера (в том числе по глубине рыхлого горизонта), покрашенные обломки, сетки-ловушки	+++	+++	—	—	—
Датировка отложений с помощью различных маркеров и радиоизотопных датировок (^{10}Be , ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)	+++	+++	++	++	—
Оценка суммарных накоплений наносов в искусственно созданных водоемах с известным сроком эксплуатации	—	—	+	+++	—
Измерения стока взвешенных и влекомых наносов в реках	—	—	+	+++	+++
Дистанционные методы					
Лазерное наземное сканирование, фотографирование	—	+++	+	—	—
Лазерное сканирование, использование аэро- и космоснимков	—	+++	+++	+++	+

* Условно обозначена относительная частота использования указанного метода или группы методов для данного масштаба исследований (от “+++” — используется повсеместно до “—” — не используется).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ДЕНУДАЦИИ ГОРНЫХ СТРАН

В нашем обзоре методы оценки денудации для территорий различной площади, начиная от оценки в конкретной точке и заканчивая горной страной, объединены в две основные группы: методы прямых и дистанционных наблюдений (табл. 1).

Группа дистанционных методов и группа методов прямых наблюдений взаимно дополняют друг друга, так как, по сути, позволяют оценивать темпы денудации в интервале времени от единичных событий до нескольких десятилетий [6]. Мониторинг стока воды и наносов на гидрологических постах — наиболее традиционный и распространенный, но постоянно совершенствующийся метод оценки суммарного выноса материала за пределы водосбора за различные интервалы времени, начиная от единичного паводка и заканчивая общим периодом наблюдений, который в отдельных случаях может составлять до ста лет. Точность оценок суммарного объема наносов, проходящих через измеряемый створ, зависит от частоты и метода отбора проб воды на мутность [3]. При этом, к сожалению, расходы наносов при прохождении экстремальных паводков, характерных для горных рек, часто не фиксируются, так как автоматическая измерительная аппаратура полностью или частично приходит в негодность при их прохождении, а прямые измерения расходов воды и отбор проб на мутность в это время технически невозможны. Кроме того, до сих пор практически не проводятся на регулярной основе измерения расходов донных наносов,

хотя все чаще встречаются исследования, где расход донных наносов фиксируется [38]. Тем самым оценка денудации, которая осуществляется на основе мониторинговых наблюдений на гидрологических постах, в целом приводит к ее занижению. При этом использование оптических методов измерения мутности, получившее распространение в последние десятилетия, способствовало упрощению определения расходов взвешенных наносов [1].

Дистанционные методы также давно используются для оценки темпов денудации. Они основаны на сопоставлении цифровых моделей рельефа (ЦМР) территории, выполненных с определенным временным интервалом (см. ссылки в работе [44]). Наземные приборы для проведения дистанционных съемок, начиная от фототеодолита и заканчивая 3D сканером, в основном ориентированы на изучение темпов отдельных экзогенных процессов или их групп в пределах склона или склонового водосбора. В то же время повторные съемки местности с большого расстояния, выполненные с использованием беспилотных летательных аппаратов (дронов), вертолетов, самолетов или космических спутников, при наличии фиксированных маркеров также позволяют строить с разной степенью точности ЦМР и использовать их для количественных оценок темпов денудации территорий разной площади. При этом временной интервал для проведения повторных съемок зависит от масштаба съемки и интенсивности трансформации рельефа за счет денудационно-аккумулятивных процессов. Так, съемка с дронов камерами высокого разре-

шения позволяет оценить темпы денудации за единичное эрозионное событие на участке склона или малом водосборе. При значительных трансформациях рельефа на горных склонах, которые могут происходить при сильных землетрясениях, одновременно сопровождаемых активизацией экзогенных процессов, целесообразно использование повторных съемок с самолета или спутника для большего охвата территории. Однако в большинстве случаев повторные аэросъемки ранее проводились с шагом в десятилетие и более. В настоящее время съемка из космоса территорий, охваченных катастрофическими событиями (сильные наводнения, землетрясения, прохождение мощных селей и т.п.), проводятся с высокой частотой. Следует учитывать, что точность оценок темпов денудации на основе использования дистанционных методов, помимо разрешающей способности используемой для съемок аппаратуры, зависит от проективного покрытия территории растительностью. Применение лазерного воздушного сканирования позволяет избежать и этих проблем, но пока оно используется недостаточно широко из-за высокой стоимости оборудования. Для повышения точности и верификации оценок темпов денудации на основе использования дистанционных методов желательно использовать наземные методы количественной оценки темпов отдельных, наиболее характерных для изучаемой территории экзогенных процессов. К числу этих методов относятся давно используемые методы реперов, шпилек, ловушек и их современные усовершенствованные аналоги [25, 28, 30 и др.].

Несмотря на существенно расширившийся набор методов изучения современных темпов денудации в горных странах, крайне ограничены исследования, в которых на количественной основе за известный интервал времени определены скорости бассейновой и русловой составляющих денудационного среза для речного бассейна [22]. Это объясняется трудоемкостью оценок перераспределения наносов по пути их транспортировки со склонов в постоянные водотоки и сложностью определения трансформаций русел малых рек с учетом перемещения донных наносов.

ВКЛАД ДЕНУДАЦИИ ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ В ГЛОБАЛЬНУЮ ДЕНУДАЦИЮ СУШИ

Глобальным изменениям денудационных процессов в XX–XXI вв. посвящено множество работ (см. [24, 39, 47, 48]). Деятельность человека на протяжении веков способствовала усилению денудации. Наиболее значительное влияние было связано с земледелием с момента его зарождения, а также вырубкой леса. Создание водохранилищ, особенно активное при строительстве крупных гид-

роэлектростанций в XX в., напротив, способствовало усилению локальной аккумуляции продуктов денудации, транспортируемых реками. В глобальном масштабе, вероятно, не менее ~16% наносов задерживается в водохранилищах [45].

Глобальный сток наносов, поступающих в Мировой океан, оценивается в диапазоне 17–21 млрд т в год [9, 32, 35, 36, 39]. При этом вследствие антропогенного воздействия сток наносов рек претерпевает кратные изменения, с ростом в некоторых регионах в 100 раз и более (см. [21]). Так, по оценкам Миллимана и Савитски [35], в то время как глобальное поступление наносов в океан в середине XX в. было на уровне 20 млрд т/год, 2000–2500 лет назад эта величина составляла 10–12.6 млрд т/год [32], а в период до плиоцена — менее 6 млрд т/год [39]. Подобное увеличение обусловлено, прежде всего, развитием земледелия, что спровоцировало глобальный рост денудации в несколько раз (в 2–10 раз по оценкам [35, 39]). Показателен пример Шри-Ланки [21], где темпы палеоденудации, установленные на основе применения ^{10}Be , составляли 13–30 т/км²/год, тогда как для этой же территории в настоящее время они достигают 130–2100 т/км²/год.

Одновременно создание водохранилищ, суммарный объем которых вырос с $0.3 \times 10^{12} \text{ м}^3$ в 1950 г. до $6.2 \times 10^{12} \text{ м}^3$ в 2010 г. [15], способствует переотложению значительной части наносов внутри гидрографической сети [15]. Согласно оценкам, в настоящее время имеется достаточно большое число зарегулированных рек, сток наносов которых более чем на 90% перехватывается водохранилищами [36]. Среди них — достаточно крупные реки, такие как Нил и Колорадо.

Из общей площади суши, составляющей порядка 90 млн км², с которой взвешенное вещество (~20 млрд т/год) выносятся реками в океан, около 6 млн км² приходится на водосборный бассейн Амазонки (сток наносов ~1.2 млрд т/год). Суммарный водосборный бассейн следующих девяти наиболее крупных рек составляет порядка 32 млн км². Но основной сток наносов формируется на водосборах малых горных рек, так как именно в их пределах максимальных значений достигают коэффициенты доставки наносов со склонов в постоянные водотоки. Для ненарушенных ландшафтов интенсивность денудационных процессов в горных районах в 20–30 раз превосходит интенсивность этих процессов в пределах равнин и низменностей [17]. Показателен пример бассейна р. Миссисипи, где сток наносов горных рр. Суситна, Купер и Стикийн, суммарная водосборная площадь которых составляет менее 4% от общей площади бассейна, составляет около трети наносов р. Миссисипи [35]. Главными факторами, определяющими формирование стока нано-

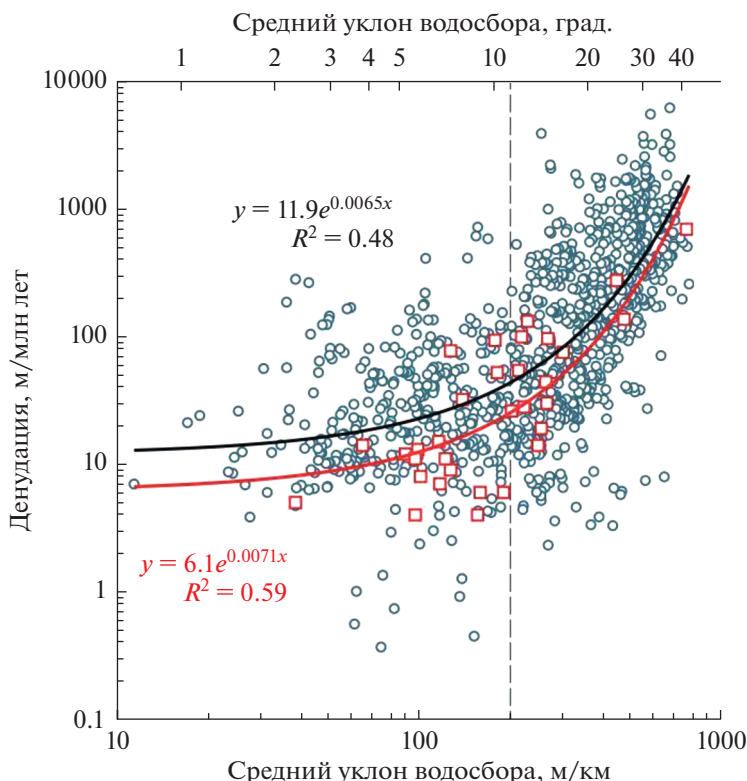


Рис. 2. Важнейший фактор, определяющий горную денудацию: средний уклон водосбора [49]. Красными символами показаны данные по стокам наносов рек, синими — данные по космогенным изотопам. Используется с официального разрешения издательства.

сов со склонов в горах, помимо климата, являются литология, тектоника и морфометрические характеристики рельефа (средняя высота речного бассейна и средний уклон водосборного бассейна) (см. [35, 37]). Так, для горных бассейнов малых рек альпийского пояса модуль стока наносов снижается от высокогорных рек, где он достигает 7000 т/км² в год, к среднегорным, где он как минимум на порядок ниже [23]. Установлена нелинейная зависимость скорости денудации с величиной среднего уклона водосбора (рис. 2), которая в равной мере прослеживается как для денудации, выявленной на основе оценки стока наносов рек, так и полученной с использованием ¹⁰Be.

Наиболее активно процессы разрушения происходят на склонах с уклонами >15°, доля которых максимальна в высокогорном поясе, и существенно снижается уже в среднегорном и далее в низкогорном поясе, где подобные склоны характерны только для участков подмыва реками коренных склонов и бедлендов [23]. В целом, на долю горных склонов с уклонами >15° приходится 52% от общей денудации [29]. При этом, как показывают новейшие исследования, в высокогорной зоне доля малых речных водосборов, в пределах которых большая часть продуктов денудации

переоткладывается, не достигая постоянных водотоков, в целом сопоставима с числом водосборов с высокими коэффициентами доставки наносов [16]. Остальной объем глобальной денудации относительно равномерно распределяется между склонами с уклонами 1°–15° [29]. Причем для территорий с уклонами в данном диапазоне целый набор факторов определяет фактические темпы денудации в речном бассейне, включая как природные (литология, климат, сейсмическая и тектоническая активность, растительный покров), так и антропогенные (доля пашни, пастбищ, карьеров по добыче полезных ископаемых и т.п.) [7]. Именно поэтому для отдельных горных массивов, где антропогенная нагрузка в низкогорном поясе достаточно велика, среднегорный пояс наиболее устойчив к процессам денудации. Большое число возможных сочетаний факторов, определяющих темпы денудации в пределах малых речных бассейнов в горах, способствует их высокой пространственной вариабельности [40]. Следует отметить, что для горных территорий с низкой антропогенной нагрузкой доминирующими факторами, определяющими темпы современной денудации, являются литология и уклон водосборов, тогда как климатические характеристики, включая слой осадков, которые определя-

ют объем стока воды, играют подчиненную роль [13].

Согласно современным оценкам доля химической денудации составляет порядка 15% от суммарной денудации, связанной с выносом реками наносов в Мировой океан [29]. Но при этом интенсивность химической денудации в горах выше, чем на равнинах, и гораздо сильнее варьирует по площади, что обусловлено различиями в литологии слагающих горные массивы пород. Так, для Альп соотношение механической и химической денудации составляет примерно 1.5 [23].

Важнейшими факторами усиления темпов денудации в горах являются сейсмическая и тектоническая активность территории [19, 27, 31, 36]. Эти процессы достаточно сложно математически формализовать и соотнести с денудацией, так как по существу их проявление стимулирует процессы разрушения горных пород и активизации некоторых экзогенных процессов, например оползней [41], в связи с чем отсутствуют прямые корреляционные связи между сейсмической активностью территории и модулем стока наносов рек [45]. Тем не менее максимальный вынос наносов с суши в океан располагается в западном секторе Тихоокеанского огненного пояса (см. рис. 1). Здесь наблюдается наиболее полное сочетание всех основных факторов, способствующих проявлению максимальных темпов денудации: высокая сейсмотектоническая активность, регулярное прохождение тайфунов с большим количеством осадков, значительная антропогенная нарушенность и горный рельеф бассейнов малых и средних рек, для которых характерны высокие коэффициенты доставки наносов в устья, расположенные на морских побережьях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совершенствование современных методов количественной оценки темпов отдельных экзогенных процессов и денудации в целом на локальном и региональном уровнях, обусловленное в первую очередь увеличением точности и расширением технологий дистанционных методов исследования, способствует активному накоплению банка данных об интенсивности современных процессов трансформации рельефа горных стран. В настоящее время степень изученности различных горных массивов мира характеризуется высокой вариабельностью. Наряду с детально исследованными территориями (Альпы, некоторые районы Пиренеев и Эфиопского нагорья) существует большое число практически не исследованных в отношении современных темпов денудации горных стран (горы Средней Азии, Иранское нагорье, Саяны и др.). Для таких территорий основным источником информации о темпах денудации по-прежнему остаются достаточно

отрывочные данные наблюдений за стоком наносов рек.

Согласно современным оценкам, максимальные темпы современной денудации наблюдаются в западном секторе Тихоокеанского огненного кольца, на долю которого приходится порядка трети от суммарного выноса наносов в Мировой океан. Следует отметить, что значительный объем продуктов денудации, транспортируемых реками, задерживается в искусственно созданных водохранилищах. Только в крупных водохранилищах мира, в основном расположенных в горах или предгорьях, согласно расчетам, выполненным на 2010 год, накопилось 6.2 млрд т наносов. Однако и малые водохранилища в горах являются накопителями наносов. Так, подсчитано, что в европейских Альпах 45% транспортируемых наносов перехватываются искусственно созданными водоемами различных размеров [23].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Раздел данной работы по методам подготовлен в рамках госзадания № 0148-2019-0005 (AAAA-A19-119021990091-4). Работа над другими 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 devoted to the methods was prepared within the framework of the state-ordered research theme no. 0148-2019-0005 (AAAA-A19-119021990091-4). Work on the other sections was carried out within the framework of 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. Айбулатов Д.Н., Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Чалов С.Р. Современные возможности использования методов дистанционного зондирования для получения информации о водных объектах // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. 2015. № 5. С. 34–37.
2. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 201 с.
3. Белозерова Е.В., Чалов С.Р. Определение мутности речных вод оптическими методами // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2013. № 6. С. 39–45.
4. Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.
5. Голосов В.Н., Ермолаев О.П. Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на

- Русской равнине. Изд-во АН Респ. Татарстан, 2019. 372 с.
6. Грачев А.М., Голосов В.Н. Оценка темпов палеоденудации в горах: основные подходы и результаты // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. Т. 84. № 5. С. 704–714.
 7. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во КГУ, 1984. 264 с.
 8. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 с.
 9. Маккавеев Н.И. Некоторые особенности эрозионно-аккумулятивного процесса // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 8. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. С. 5–16.
 10. Мозжерин В.В. Расчленение стока взвешенных наносов рек Северной Евразии на русловую и бассейновую составляющие и его геоморфологическая интерпретация // Региональные исследования природно-территориальных комплексов / ред. В.В. Сироткин, Р.Р. Денмухаметов. Казань: Меддок, 2012. С. 93–100.
 11. Соболев С.С. Развитие эрозионных процессов на территории европейской части СССР и борьба с ними. М.: Изд-во АН СССР, 1948. Т. 1. 305 с.
 12. Чалов Р.С., Сидорчук А.Ю., Голосов В.Н. Эрозионно-русловые системы. М.: ИНФРА-М, 2017. 702 с.
 13. Aalto R., Dunne T., Guyot J.L. Geomorphic controls on Andean denudation rates // J. Geol. 2006. V. 114. P. 85–99.
 14. Bagnold R.A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. London: Methuen, 1941. 265 p.
 15. Basson G. Reservoir sedimentation – An overview of global sedimentation rates and predicted sediment deposition // Abstracts of the Workshop on Erosion, Transport and Deposition of Sediment. Bern, Switzerland, 2008.
 16. Carrivick J.L., Heckmann T., Turner A., Fischer M. An assessment of landform composition and functioning with the first proglacial system dataset of the central European Alps // Geomorphology. 2018. V. 321. P. 117–128.
 17. Dedkov A.P., Moszherin V.I. Erosion and sediment yield in mountain regions of the world // Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions (Proceedings of the Chengdu Symposium, July, 1992). 1992. № 209. IAHS Publ. P. 29–36.
 18. Gilbert G.K. Hydraulic-Mining Debris in the Sierra Nevada // U.S. Geological Survey Professional Paper. 1917. 154 p.
 19. Golosov V., Zhang X.B., He X.B., Tang Q., Zhou P. Principal denudation processes and their contribution to fluvial suspended sediment yields in the Upper Yangtze River Basin and Volga River Basin // J. Mountain Sci. 2015. V. 12. P. 101–122.
 20. 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.
 21. Hewawasam T., von Blackenburg F., Schaller M., Kubik P. Increase of human over natural erosion rates in tropical highlands constrained by cosmogenic nuclides // Geology. 2003. V. 31. P. 597–600.
 22. Hinderer M. From gullies to mountain belts: a review of sediment budgets at various scales // Sediment. Geol. 2012. V. 280. P. 21–59.
 23. Hinderer M., Kastowski M., Kamelger A., Bartolini C., Schlunegger F. River loads and modern denudation of the Alps – A review // Earth-Sci. Rev. 2013. V. 118. P. 11–44.
 24. IAHS-ICCE Erosion and sediment yields in the changing environment // Proceedings of an IAHS International Commission on Continental Erosion symposium held at the Institute of Mountain Hazards and Environment. IAHS Press, 2012.
 25. Johnson J.P.L., Whipple K.X., Sklar L.S. Contrasting bedrock incision rates from snowmelt and flash floods in the Henry Mountains, Utah // Geol. Soc. Am. Bull. 2010. V. 122. P. 1600–1615.
 26. Keller E., Adamaitis C., Alessio P., Anderson S., Goto E., Gray S., Gurrola L., Morell K. Applications in geomorphology // Geomorphology. 2019. V. 366. 106729.
 27. Kober F., Zeilinger G., Hippe K., Marc O., Lendziach T., Grischott R., Christl M., Kubik P.W., Zola R. Tectonic and lithological controls on denudation rates in the central Bolivian Andes // Tectonophysics. 2015. V. 657. P. 230–244.
 28. Kolb A., Barth E., Koch R., Larsen R. Time-of-flight cameras in computer graphics // Computer Graphics Forum. 2010. V. 29. P. 141–159.
 29. Larsen I.J., Montgomery D.R., Greenberg H.M. The contribution of mountains to global denudation // Geology. 2014. V. 42. P. 527–530.
 30. Lawler D.M. Advances in the continuous monitoring of erosion and deposition dynamics: Developments and applications of the new PEEP-3T system // Geomorphology. 2008. V. 93. P. 17–39.
 31. Li G., West A.J., Densmore A.L., Jin Z., Zhang F., Wang J., Clark M., Hilton R.J. Earthquakes drive focused denudation along a tectonically active mountain front // Earth Planet. Sci. Lett. 2017. V. 472. P. 253–265.
 32. McLennan S.M. Weathering and global denudation // J. Geol. 1993. V. 101. P. 295–303.
 33. Milliman J.D., Meade R.H. World-wide delivery of sediment to the oceans // J. Geol. 1983. V. 91. P. 1–21.
 34. Milliman J.D. Fluvial sediment in coastal seas: flux and fate // Nature and Resources. 1990. V. 26. P. 12–22.
 35. Milliman J.D., Syvitski J.P. Geomorphic tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers // J. Geol. 1992. V. 100. P. 525–544.
 36. Milliman J.D., Farnsworth K.L. River discharge to the coastal ocean: A global synthesis. Cambridge Univ. Press, 2013. 394 p.
 37. Mishra A.K., Placzek C., Jones R. Coupled influence of precipitation and vegetation on millennial-scale erosion rates derived from ^{10}Be // PLoS ONE. 2019. V. 14. e0211325.
 38. Morche D., Schmidt K.H., Sahling I., Herkommer M., Kutschera J. Volume changes of Alpine sediment stores in a state of post-event disequilibrium and the implications for downstream hydrology and bed load transport // Norw. J. Geogr. 2008. V. 62. P. 89–101.

39. *Panin A.* Land-ocean sediment transfer in palaeotimes, and implications for present-day natural fluvial fluxes // *Sediment transfer through the fluvial system* / Golosov V., Belyaev V. and Walling D.E. (Eds.). IAHS, 2004. V. 288. P. 115–124.
40. *Schlunegger F., Norton K.P., Caduff R.* Hillslope processes in temperate environments // *Treatise in Geomorphology. Mountain and Hillslope Geomorphology* / Marston R., Stoffel M. (Eds.). London: Elsevier, 2011. V. 3.
41. *Sidle R.C., Ochiai H.* Landslides: Processes, prediction, and land use. American Geophysical Union, 2006. 312 p.
42. *Strahler A.N.* Dynamic basis of geomorphology // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1952. V. 63. P. 923–938.
43. *Strahler A.N.* Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1952. V. 63. P. 1117–1142.
44. *Turowski J.M., Cook K.L.* Field techniques for measuring bedrock erosion and denudation // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2017. V. 42. P. 109–127.
45. *Vanmaercke M., Poesen J., Broeckx J., Nyssen J.* Sediment yield in Africa // *Earth-Sci. Rev.* 2014. V. 136. P. 350–368.
46. *Walling D.E., Webb B.W.* Patterns of sediment yield // *Background to Palaeohydrology* / K.J. Gregory (Ed.). Chichester, UK: Wiley, 1983. P. 69–100.
47. *Walling D.E.* Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers // *Geomorphology*. 2006. V. 79. P. 192–216.
48. *Walling D.E.* The impact of global change on erosion and sediment transport by rivers: current progress and future challenges. Paris, France: UNESCO, 2009. 26 p.
49. *Willenbring J.K., Codilean A.T., McElroy B.* Earth is (mostly) flat: Apportionment of the flux of continental sediment over millennial time scales // *Geology*. 2013. V. 41. P. 343–346.

Modern Denudation in the Mountains and Its Contribution to the Global Land Denudation

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

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

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

*e-mail: agrachev@igras.ru

**e-mail: golosov@gmail.com

Increased attention to the quantitative assessment of the modern denudation of mountainous territories is due to the significance of the relief transformation within these territories and the key role of the material formed in the process of denudation of the mountains in the total volume of sediments transferred from land to the World Ocean. Significant progress in, first of all, remote sensing techniques for studying the rates of individual exogenous processes and denudation in general, which has occurred over the past decade, contributed to the significant quantitative data increase related to the dynamics of relief transformation. This was enabled by two factors: a significant increase in the accuracy of digital elevation models created using remote sensing methods and the simplification of the processing of the data obtained. The article summarizes the published results and systematizes the methods for studying modern land denudation. It is shown that the combined usage of a set of direct observation methods and remote sensing methods allows the most detailed characterization of space-time changes in the relief at various scales of the studies. About 52% of land denudation products are formed on slopes with inclinations >15%. For the remaining territories in the mountains, the rates of denudation are determined by a different combination of a set of factors: seismotectonic activity, meteorological characteristics, lithology, and anthropogenic load. The maximum cumulative effect of these factors is achieved in the basins of small rivers. It is due to the optimal combination of the above factors that slightly less than one third (6.8 billion tons) of the total volume of sediment supplied from land to the world ocean is formed due to the sediment yield of small and medium-sized rivers of the western sector of the Ring of Fire of the Pacific Ocean.

Keywords: mountains, denudation, quantitative methods, sediment yield

REFERENCES

1. Aibulatov D.N., Zotov L.V., Frolova N.L., Chalov S.R. Modern possibilities for the use of remote sensing methods to obtain information about water bodies. *Zemlya iz Kosmosa: Naibolee Effektivnye Resheniya*, 2015, no. 5, pp. 34–37. (In Russ.).
2. Alekseevskii N.I. *Formirovanie i dvizhenie rechnykh nanosov* [Formation and Movement of River Sediments]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1998. 201 p.
3. Belozerova E.V., Chalov S.R. Determination of turbidity of river waters by optical methods. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2013, no. 6, pp. 39–45. (In Russ.).

4. Golosov V.N. *Eroзионно-akkumulyativnye protsessy v rechnykh basseynakh osvoennykh ravnin* [Erosion-Accumulative Processes in River Basins of Developed Plains]. Moscow: GEOS Publ., 2006. 296 p.
5. Golosov V.N., Ermolaev O.P. *Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti razvitiya sovremennykh protsessov prirodno-antropogennoi erozii na Russkoi ravnine* [Spatio-Temporal Patterns of Development of Modern Processes of Natural and Anthropogenic Erosion on the Russian Plain]. Kazan: Akad. Nauk Respubl. Tatarstan, 2019. 372 p.
6. Grachev A.M., Golosov V.N. Evaluation of the paleodenudation rates in the mountains: Main approaches and results. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 5, pp. 704–714. (In Russ.).
7. Dedkov A.P., Mozzherin V.I. *Eroziya i stok nanosov na Zemle* [Erosion and Sediment Yield on Earth]. Kazan: Kazan. Gos. Univ., 1984. 264 p.
8. Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* [River Channel and Erosion in Its Basin]. Moscow: Akad. Nauk SSSR, 1955. 346 p.
9. Makkaveev N.I. Some features of the erosion-accumulative process. *Eroziya Pochv i Ruslovy Protessy*, 1981, no. 8, pp. 5–16. (In Russ.).
10. Mozzherin V.V. Dividing the runoff of suspended sediment from rivers of Northern Eurasia into channel and basin components and its geomorphological interpretation. In *Regional'nye issledovaniya prirodno-territorial'nykh kompleksov* [Regional Studies of Natural and Territorial Complexes]. Sirotkin V.V., Denmukhametov R.R., Eds. Kazan: Meddok Publ., 2012, pp. 93–100. (In Russ.).
11. Sobolev S.S. *Razvitie erozionnykh processov na territorii evropeiskoi chasti SSSR i bor'ba s nimi* [Development of Erosion Processes in the European Part of the USSR and Counteracting Them]. Moscow: Akad. Nauk SSSR, 1948, vol. 1, 305 p.
12. Chalov R.S., Sidorchuk A.Yu., Golosov V.N. *Eroзионно-ruslovye sistemy* [Erosion-Channel Systems]. Moscow: INFRA-M Publ., 2017. 702 p.
13. Aalto R., Dunne T., Guyot J.L. Geomorphic controls on Andean denudation rates. *J. Geol.*, 2006, vol. 114, no. 1, pp. 85–99.
14. Bagnold R.A. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London: Methuen Publ., 1941. 265 p.
15. Basson G. Reservoir sedimentation – An overview of global sedimentation rates and predicted sediment deposition. In *Abstracts of the Workshop on Erosion, Transport and Deposition of Sediment*. Bern, Switzerland, 2008.
16. Carrivick J.L., Heckmann T., Turner A., Fischer M. An assessment of landform composition and functioning with the first proglacial system dataset of the central European Alps. *Geomorphology*, 2018, vol. 321, pp. 117–128.
17. Dedkov A.P., Mozzherin V.I. Erosion and sediment yield in mountain regions of the world. In *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions* // Walling D.E., Davies T.R., Hasholt B., Eds. Wallingford, UK: IAHS Press, 1992, pp. 29–36.
18. Gilbert G.K. *Hydraulic-Mining Debris in the Sierra Nevada*. U.S. Geological Survey Professional Paper no. 105. Washington, DC: USGS, 1917. 154 p.
19. Golosov V., Zhang X.B., He X.B., Tang Q., Zhou P. Principal denudation processes and their contribution to fluvial suspended sediment yields in the Upper Yangtze River Basin and Volga River Basin. *J. Mt. Sci.*, 2015, vol. 12, pp. 101–122.
20. 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.
21. Hewawasam T., von Blackenburg F., Schaller M., Kubik P. Increase of human over natural erosion rates in tropical highlands constrained by cosmogenic nuclides. *Geology*, 2003, vol. 31, pp. 597–600.
22. Hinderer M. From gullies to mountain belts: a review of sediment budgets at various scales. *Sediment. Geol.*, 2012, vol. 280, pp. 21–59.
23. Hinderer M., Kastowski M., Kamelger A., Bartolini C., Schlunegger F. River loads and modern denudation of the Alps – A review. *Earth-Sci. Rev.*, 2013, vol. 118, pp. 11–44.
24. *Erosion and Sediment Yields in the Changing Environment*. Collins A.L., Golosov V., Horowitz A.J., Lu X., Stone M., Walling D.E., Zhang X., Eds. Proc. IAHS Int. Commission on Continental Erosion Symp. Held at the Institute of Mountain Hazards and Environment. IAHS Press, 2012. 462 p.
25. Johnson J.P.L., Whipple K.X., Sklar L.S. Contrasting bedrock incision rates from snowmelt and flash floods in the Henry Mountains, Utah. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2010, vol. 122, pp. 1600–1615.
26. Keller E., Adamaitis C., Alessio P., Anderson S., Goto E., Gray S., Gurrola L., Morell K. Applications in geomorphology. *Geomorphology*, 2019, vol. 366, 106729. doi 10.1016/j.geomorph.2019.04.001
27. Kober F., Zeilinger G., Hippe K., Marc O., Lendzioch T., Grischott R., Christl M., Kubik P.W., Zola R. Tectonic and lithological controls on denudation rates in the central Bolivian Andes. *Tectonophysics*, 2015, vol. 657, pp. 230–244.
28. Kolb A., Barth E., Koch R., Larsen R. Time-of-flight cameras in computer graphics. *Comput. Graph. Forum*, 2010, vol. 29, pp. 141–159.
29. Larsen I.J., Montgomery D.R., Greenberg H.M. The contribution of mountains to global denudation. *Geology*, 2014, vol. 42, pp. 527–530.
30. Lawler D.M. Advances in the continuous monitoring of erosion and deposition dynamics: Developments and applications of the new PEEP-3T system. *Geomorphology*, 2008, vol. 93, pp. 17–39.
31. Li G., West A.J., Densmore A.L., Jin Z., Zhang F., Wang J., Clark M., Hilton R.J. Earthquakes drive focused denudation along a tectonically active mountain front. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2017, vol. 472, pp. 253–265.
32. McLennan S.M. Weathering and global denudation. *J. Geol.*, 1993, vol. 101, pp. 295–303.
33. Milliman J.D., Meade R.H. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J. Geol.*, 1983, vol. 91, no. 1, pp. 1–21.
34. Milliman J.D. Fluvial sediment in coastal seas: flux and fate. *Nature and Resources*, 1990, vol. 26, no. 4, pp. 12–22.

35. Milliman J.D., Syvitski J.P. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *J. Geol.*, 1992, vol. 100, pp. 525–544.
36. Milliman J.D., Farnsworth K.L. *River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis*. Cambridge Univ. Press, 2013. 394 p.
37. Mishra A.K., Placzek C., Jones R. Coupled influence of precipitation and vegetation on millennial-scale erosion rates derived from ^{10}Be . *PLoS ONE*, 2019, vol. 14, no. 1, e0211325. doi 10.1371/journal.pone.0211325
38. Morche D., Schmidt K.H., Sahling I., Herkommer M., Kutschera J. Volume changes of Alpine sediment stores in a state of post-event disequilibrium and the implications for downstream hydrology and bed load transport. *Norw. J. Geogr.*, 2008, vol. 62, pp. 89–101.
39. Panin A. Land-ocean sediment transfer in palaeotimes, and implications for present-day natural fluvial fluxes. In *Sediment Transfer Through the Fluvial System: Proceedings of the International Symposium Held at Moscow, Russia, from 2 to 6 August, 2004*. Golosov V., Belyaev V., Walling D.E., Eds. IAHS, 2004, pp. 115–124.
40. Schlunegger F., Norton K.P., Caduff R. Hillslope processes in temperate environments. In *Treatise in Geomorphology. Mountain and Hillslope Geomorphology*. Marston R., Stoffel M., Eds. San Diego: Academic Press, 2013, vol. 7, pp. 337–354.
41. Sidle R.C., Ochiai H. *Landslides: Processes, Prediction, and land use*. Washington, DC: Am. Geophys. Union, 2006. 312 p.
42. Strahler A.N. Dynamic basis of geomorphology. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1952, vol. 63, pp. 923–938.
43. Strahler A.N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1952, vol. 63, pp. 1117–1142.
44. Turowski J.M., Cook K.L. Field techniques for measuring bedrock erosion and denudation. *Earth Surf. Process. Landf.*, 2017, vol. 42, pp. 109–127.
45. Vanmaercke M., Poesen J., Broeckx J., Nyssen J. Sediment yield in Africa. *Earth-Sci. Rev.*, 2014, vol. 136, pp. 350–368.
46. Walling D.E., Webb B.W. Patterns of sediment yield. In *Background to Palaeohydrology*. Gregory K.J., Ed. Chichester, UK: Wiley, 1983, pp. 69–100.
47. Walling D.E. Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*, 2006, vol. 79, pp. 192–216.
48. Walling D.E. *The Impact of Global Change on Erosion and Sediment Transport by Rivers: Current Progress and Future Challenges*. Paris: UNESCO, 2009. 26 p.
49. Willenbring J.K., Codilean A.T., McElroy B. Earth is (mostly) flat: Apportionment of the flux of continental sediment over millennial time scales. *Geology*, 2013, vol. 41, no. 3, pp. 343–346.