

СТОК НАНОСОВ В ГОРАХ КАВКАЗА И ЕГО ТРЕНДЫ  
КАК ОТРАЖЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ  
И АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

© 2023 г. В. Н. Голосов<sup>a, b, c, \*</sup>, А. С. Цыпленков<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

<sup>b</sup>Институт Географии РАН, Москва, Россия

<sup>c</sup>Казанский Федеральный университет, Казань, Россия

\*e-mail: golossov@gmail.com

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 25.04.2023 г.

Принята к публикации 25.08.2023 г.

Сток наносов горных рек является важной характеристикой, отражающей интенсивность денудации в различных высотных поясах, а также ее изменений. Кавказский регион, включающий Большой и Малый Кавказ, характеризуется значительной территориальной контрастностью, связанной с различиями в геологии-геоморфологическом строении, сейсмотектонической активности, климате, которые в совокупности определяют образ жизни местного населения и особенности антропогенного воздействия на ландшафты. В статье представлены результаты оценок современных темпов денудации региона, полученные на основе обработки базы данных о стоке взвешенных наносов рек по 194 постам с длительностью наблюдений свыше 10 лет. Для выявления влияния основных природно-антропогенных факторов на сток наносов рек использованы рассчитанные и опубликованные данные о пространственно распределенных показателях, характеризующих отдельные факторы или их сочетания. Проведена статистическая обработка зависимостей между отдельными показателями и стоком взвешенных наносов рек. Установлено, что средний для региона модуль стока наносов рек ( $SSY$ ) составляет  $446 \text{ т км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ . Максимальных значений ( $SSY > 1500 \text{ т км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ) он достигает на Восточном Кавказе, где в последние десятилетия он остается высоким и по ряду бассейнов продолжает расти. Для остальных частей Большого Кавказа выявлен тренд снижения стока наносов, обусловленный сокращением ледникового питания рек и, более локально, сокращением пастбищной нагрузки.

**Ключевые слова:** денудация, пространственно-временной анализ, взвешенные наносы, аккумуляция в водохранилищах, влекомые наносы, перигляциальная зона, Кавказ

**DOI:** 10.31857/S2587556623070075, **EDN:** HEUABX

## ВВЕДЕНИЕ

Современные изменения стока наносов рек мира обусловлены совместным воздействием климатических изменений, особенно значимых в последние три десятилетия, и все возрастающей антропогенной нагрузкой (Cendrero et al., 2022; Syvitski et al., 2022). В горах изменения климата, обусловленные глобальным потеплением, разнонаправленно действуют в различных высотных поясах, при этом однонаправленно влияя на усиление или ослабление стока наносов в каждом из поясов. Напротив, антропогенное воздействие часто разнонаправленно влияет на сток наносов рек в пределах одного высотного пояса, способствуя как усилению темпов денудации и поступления наносов в реки, так и снижению стока на-

носов за счет строительства водохранилищ. В настоящее время в водохранилищах задерживается порядка 50% от суммарного стока наносов рек мира (Syvitski et al., 2022; Vorosmarty et al., 2003). В отдельных случаях прекращение антропогенного воздействия, например забрасывание сельскохозяйственных террас на горных склонах стимулирует развитие оползневых процессов, что ведет к росту стока наносов рек (Remondo et al., 2005). При этом антропогенное воздействие на бассейны горных рек имеет разнонаправленные тренды в зависимости от социально-экономических особенностей развития регионов, в которых они располагаются. Так, для большинства горных массивов зарубежной Европы в целом характерно снижение антропогенной нагрузки в последние

десятилетия за счет забрасывания сельскохозяйственных земель, что ведет к изменению склонового стока и смыва (Garcia-Ruiz and Lana-Renault, 2011). Эта тенденция проявляется от Пиренеев (Garcia-Ruiz and Lasanta, 1990) до Карпат (Kozak, 2003), включая Альпы (Schirpke et al., 2022). Везде отмечается забрасывание ранее обрабатываемых земель, сокращение площадей пастбищ, расширение залесенности склонов за счет, в том числе, посадок леса. В современных экономических реалиях развитие сельскохозяйственного производства в горах региона становится малорентабельным, и оно смещается в районы предгорий, где антропогенная нагрузка на ландшафты достигает максимальных значений (Remondo et al., 2005). Кроме того, даже в пределах крупных горных туристических центров, которые продолжают развиваться, большое внимание уделяется вопросам минимизации негативного воздействия деятельности человека на окружающую среду, что также приводит к стабилизации антропогенно обусловленного потока наносов, формирующегося на склонах водосборов и поступающих в речные русла.

В отличие от стока воды, который в горах достаточно быстро реагирует на изменения условий его формирования на водосборе из-за климатических изменений и характера антропогенной нагрузки, перенос наносов в каскадных системах, которыми являются речные бассейны, во многом определяется особенностями рельефа различных элементов флювиальной сети. Особенности рельефа склонов определяют коэффициенты доставки наносов со склонов междуречий в днища долин и дальнейший перенос рыхлообломочного материала по долинной сети. Поэтому наиболее значимое влияние на транспорт наносов по речным руслам оказывают экстремальные паводки, которые за одно событие транспортируют объемы наносов, сопоставимые со стоком наносов за несколько лет (Borga et al., 2014). При частоте наблюдений за мутностью воды 1–2 раза в сутки во время половодий на гидрологических постах сети РОСГИДРОМЕТ (Чалов и др., 2019), пиковые значения стока наносов часто не регистрируются. Повторяемость подобных событий в верхних звеньях флювиальной сети, особенно среднегорно-высокогорного пояса, намного выше, чем в крупных речных бассейнах. В этой связи для больших регионов наиболее показательными являются данные по темпам заполнения крупных водохранилищ, аккумулирующих большую часть поступающих в них наносов.

Антропогенное воздействие на речные бассейны Западного и Центрального Кавказа, несмотря на довольно продолжительную историю освоения данной территории человеком, в целом было существенно ниже по сравнению с другими горными регионами Европы, в том числе и с Восточ-

ным Кавказом. Сельскохозяйственное воздействие было ограничено как в связи с низкой плотностью населения, так и с достаточно высокой залесенностью, препятствующей развитию скотоводства, в отличие от Восточного Кавказа. Рост антропогенного воздействия начался только со второй половины XIX в. в связи с более активным освоением данной части Российской империи. Это привело к росту численности населения, особенно в предгорьях, как вдоль побережья Черного моря, так и в Предкавказье. В настоящее время антропогенная нагрузка на части речных бассейнов, расположенных в предгорьях, а также в низкогорно-среднегорной зоне сопоставима с нагрузкой, которая наблюдается в аналогичных высотных поясах Альп и других горных массивов Центральной и южной Европы. Но в среднегорно-низкогорном поясе влияние деятельности человека нарастает неравномерно и локализовано в отдельных речных бассейнах (Buchner et al., 2020). В этой связи представляется важным оценить соотношение вклада природных и антропогенных факторов в сток наносов рек Кавказского региона, а также определить их влияние на тренды стока наносов за антропоцен (Zalasiewicz et al., 2015), то есть за период с 1945–1950 гг. по настоящее время.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кавказский регион расположен между Черным и Каспийским морями. Он включает в себя Большой и Малый Кавказ, отделенные друг от друга Рионской и Куринской низменностями, и Предкавказье, примыкающее к Большому Кавказу с севера. Кавказские горы относятся к Европейско-Азиатскому (Альпийско-Гималайскому) горному поясу, который пересекает всю Евразию с запада на восток. Для высокогорий Большого Кавказа характерен молодой рельеф альпийского типа, модифицированный гляциальными-нивальными процессами в четвертичный период (Можжерин, Шарифуллин, 2014). Большой Кавказ является важным барьером для воздушных масс, движущихся с северо-запада, определяя разницу климата между Предкавказьем и Закавказьем. В целом, Большой Кавказ способствует высокой вариабельности климатических характеристик и климата в целом. Например, среднегодовое количество осадков на Западном Кавказе в четыре раза больше, чем на Восточном Кавказе. В то же время для Закавказья характерны и более значительные осадки, которые могут достигать  $4000 \text{ мм год}^{-1}$  в приморской части (Volodicheva, 2002). Различия климатических условий определяют особенности растительного покрова разных высотных зон, и, в конечном счете, специфику антропогенного воздействия.

Территория Большого Кавказа достаточно четко подразделяется на три региона, а именно: Западный, Центральный и Восточный Кавказ. Границы между ними проходят по трансектам, пересекающим Главный Кавказский хребет в створах главных вершин Эльбруса и Казбека (Tielidze and Wheate, 2018). Северный мегасклон Большого Кавказа в рамках данного деления достаточно четко подразделяется по крупным речным бассейнам. Бассейн р. Кубани дренирует большую часть северного склона Западного Кавказа, бассейны рр. Терека и Малки – Центрального Кавказа, а бассейны рр. Сулак и Самур – северо-восточный склон Восточного Кавказа. Южный мегасклон Большого Кавказа более короткий и более увлажненный в пределах Западного и Центрального Кавказа.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки пространственных различий в темпах денудации и проведения анализа влияния факторов на сток наносов была использована база данных, включающая 194 гидрологических поста с измеренными расходами воды и мутностью со средним медианным периодом наблюдений 18 лет (Golosov and Tsyplenkov, 2021). Модуль стока наносов рек рассчитан по формуле:

$$SSY = \frac{\sum \bar{Q} \times \overline{SSC} \times 31.5 \times 10^3}{F}, \quad (1)$$

где  $SSY$  – среднегодовой модуль стока взвешенных наносов,  $\text{т км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ;  $\bar{Q}$  – среднегодовой расход воды,  $\text{м}^3 \text{ с}^{-1}$ ;  $\overline{SSC}$  – среднегодовая мутность,  $\text{г м}^{-3}$ ;  $F$  – площадь водосбора,  $\text{км}^2$ ;  $n$  – период наблюдений, лет. Местоположение гидрологических постов определялось по топографическим картам и спутниковым снимкам. Границы водосборов определены по глобальной цифровой модели рельефа ALOS World 3D (AW3D30) японского агентства аэрокосмических исследований с пространственным разрешением 25 м. Гидрологическая коррекция и отрисовка границ водосбора произведена в ArcMap 10.8. Для валидации данных наблюдений на гидрологических постах использовались ранее опубликованные данные о заилиении водохранилищ на рр. Кубани (Курбатова, 2014; Лагута, Погорелов, 2018, 2019; Погорелов и др., 2022) и Сулаке (Петров, Саидов, 2019).

Для пересчета из модулей стока наносов ( $SSY$ ,  $\text{т км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ) в темпы денудационного сноса ( $h_c$ ,  $\text{мм год}^{-1}$ ) была использована следующая формула (Мозжерин, Шарифуллин, 2014):

$$h_c = \frac{SSY}{2.65} \times 10^{-3}, \quad (2)$$

где 2.65 – плотность коренных пород ( $\text{т м}^{-3}$ ), оставленная таковой, как в оригинальном уравнении (Мозжерин, Шарифуллин, 2014).

Для каждого бассейна было получено несколько переменных, описывающих различные факторы, подразделенные на ряд групп (табл. 1): геолого-топографические, почвенные, литолого-климатические, ботанико-антропогенные и метеорологические. Был определен для каждого речного бассейна нормализованный индекс крутизны ( $K_{sn}$ ,  $\text{m}^{0.9}$ ), который является достаточно широко используемой характеристикой для оценки связей между рельефом и темпами денудации (DiBiase et al., 2010; Vanacker et al., 2015; Vezzoli et al., 2020).  $K_{sn}$  рассчитан по формуле (Wobus et al., 2006):

$$K_{sn} = SF^\theta, \quad (3)$$

где  $S$  – уклон русла,  $\text{м м}^{-1}$ ;  $F$  – площадь водосбора,  $\text{м}^2$ ;  $\theta$  – индекс вогнутости, установленный равным 0.45, чтобы упростить сравнение между водотоками с разными площадями водосбора и вогнутостью.  $K_{sn}$  был рассчитан в среде MATLAB с использованием программного обеспечения Topo Toolbox (Schwainghart and Scherler, 2017). В качестве интегральной характеристики длины склонов в пределах речных бассейнов использована предварительно рассчитанная высота над ближайшим водотоком ( $HAND$ , м) в наборе данных MERIT (Yamazaki et al., 2019). Чтобы оценить потенциальную роль сейсмической активности для выявления наблюдаемых пространственных изменений  $SSY$  использовалось взвешенное по площади среднее пиковое ускорение грунта ( $PGA$ ,  $\text{м с}^{-2}$ ), обобщенное в GSHP Global Seismic Hazard Dataset (Giardini et al., 2003).

Для оценки пространственных различий в темпах химического выветривания была использована глобальная база данных литологических карт GLiM (Hartmann and Moosdorf, 2012) и средние скорости химического выветривания ( $CWR$ ,  $\text{т км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ), рассчитанные для каждого отдельного класса GLiM (Hartmann et al., 2014). Для каждого речного бассейна были оценены средневзвешенные  $CWR$  по его площади.

Для оценки влияния различий почвенного покрова на формирования смыва была использована карта фракций песка ( $SAND$ , %), созданная на основе изучения верхнего слоя почвы (глубина 0–30 см) и доступной в базе данных SoilGrids 2.0 Международного справочно-информационного центра почв (Hengl et al., 2017).

Площади пашни, леса и участков, лишенных почвенного покрова (скальные выходы, незадернованные участки рыхлообломочного материала в перигляциальной зоне, бедленды и т.п.), для каждого бассейна были рассчитаны по данным картирования территории Кавказа по спутнико-

**Таблица 1.** Обзор показателей, влияющих на формирование стока наносов на реках Кавказского региона, по группам факторов

Символ	Показатель	Единица измерения	Источник
Геолого-топографические факторы			
<i>A</i>	Площадь водосбора	км <sup>2</sup>	Source of SSY data
<i>K<sub>sn</sub></i>	Нормированный индекс крутизны	м <sup>0.9</sup>	(Wobus et al., 2006)
<i>HAND</i>	Высота над ближайшим днищем долины	м	(Yamazaki et al., 2019)
<i>PGA</i>	Интегральная оценка сейсмичности	м с <sup>-2</sup>	(Giardini et al., 1999; Sheldock et al., 2000)
Почвенный фактор			
<i>SAND</i>	Средняя доля песка в верхнем слое почвы (0–30 см)	%	(Hengl et al., 2017)
Литолого-климатический фактор			
<i>CWR</i>	Скорость химического выветривания	т км <sup>-2</sup> год <sup>-1</sup>	(Hartmann and Moosdorf, 2012; Hartmann et al., 2014)
Ботанико-антропогенные факторы			
<i>CANOPY</i>	Высота полога леса	м	(Potapov et al., 2021)
<i>BARREN</i>	Доля земель, лишенных растительности	%	(Buchner et al., 2020)
<i>CROPLAND</i>	Доля пашни		
<i>FOREST</i>	Доля леса		
Метеорологические факторы			
<i>GLACIER</i>	Доля ледников на 1960 г.	%	(Raup et al., 2007)
<i>P</i>	Среднегодовой слой осадков за период 1958–2018 гг.	мм	(Abatzoglou et al., 2018)
<i>AET</i>	Среднегодовая температура воздуха за период 1958–2018 гг.	°C	
<i>GLORED</i>	Эрозионный потенциал осадков	МДж мм га <sup>-1</sup> час <sup>-1</sup> год <sup>-1</sup>	(Panagos et al., 2017)

вым снимкам Landsat на 2015 г. (Buchner et al., 2020). Площади ледников на 2014 г. взяты из базы данных GLIMS (Raup et al., 2007). Также была оценена средняя высота кроны деревьев (*CANOPY*, м) в пределах водосбора как показатель структуры леса и надземной биомассы. Для этого использовалась 30-метровая глобальная карта высот лесного полога (Potapov et al., 2021). Оценки динамики изменения площади перигляциальных зон в высокогорной зоне Большого Кавказа за разные интервалы времени выполнены на основе использования опубликованных данных о сокращении площади ледников (Tielidze and Wheate, 2018; Tielidze et al., 2022).

Среднегодовые климатические параметры, осредненные по каждому речному бассейну, рассчитаны на основе набора данных TerraClimate (Abatzoglou et al., 2018) за 1958–2018 гг. Оценивались среднегодовые осадки (*P*, мм) и среднегодовая температура воздуха (*AET*, °C). Усредненный по каждому речному бассейну среднегодовой эрозионный индекс дождевых осадков был рассчитан по данным базы глобальной эрозионного

потенциала дождевых осадков (*GLORED*, МДж мм га<sup>-1</sup> час<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>), созданной на основе обработки данных по осадкам с 3530 метеостанций по всему миру (Panagos et al., 2017). Для территории Кавказа при расчете эрозионного потенциала использованы данные краткосрочных наблюдений за интенсивностью ливней в 1961–1983 гг. по данным Ларионова (1993). Следует отметить, что густота метеорологических станций в среднегорно-высокогорном поясе Большого Кавказа очень низкая, что, несомненно, снижает достоверность оценок пространственных изменений всех метеорологических параметров.

Ограничением для использования в анализе ряда других факторов, влияющих на формирование стока наносов, послужила недоступность их пространственно-распределенных величин. В частности, в связи с этим ограничением не учитывался фактор количества выпасаемых на пастбищах домашних животных. Данный фактор оказывает значительное влияние на проективное покрытие почвы на пастбищах, которое в свою очередь определяет темпы смыва (Wiesmair et al.,

2017). Другим важным показателем, который не учитывался, является площади селитебных территорий и густота дорожной сети, включая грунтовые дороги, продукты размыва которых являются зачастую основным поставщиком рыхлообломочного материала в горные водотоки (Al-Chokhachy et al., 2016). Формально оба вышеуказанных показателя могут быть связаны с плотностью населения. Однако в действительности это не совсем так, так как значительное влияние оказывают образ жизни и традиции народа, проживающего в конкретном горном ландшафте.

Для визуализации и лучшего понимания пространственных закономерностей стока наносов в пределах Кавказа, среднемноголетний модуль стока взвешенных наносов  $SSY$  был проинтерпolated в границах региона. Был использован метод  $k$ -ближайших соседей с предиктором высоты рельефа местности, реализованный на языке программирования  $R$  при помощи библиотеки `kknn` (Schliep and Hochenbichler, 2016). На основе подобранных ранее параметров метода  $k$ -ближайших соседей, исследуемая территория была классифицирована по классам темпов денудационного сноса, согласно (Мозжерин, Шарифуллин, 2014):  $<0.02, 0.025–0.1, 0.1–0.25, >0.25 \text{ мм год}^{-1}$ . Подробное описание использованной методики приведено в работе (Tsyplenkov et al., 2019).

Корреляционный анализ производился при помощи непараметрического теста Спирмена в среде языка  $R$ . Параметры описательной статистики (среднее, медиана, стандартное отклонение и т.д.), приводимые ниже по тексту, так же были рассчитаны в  $R$ .

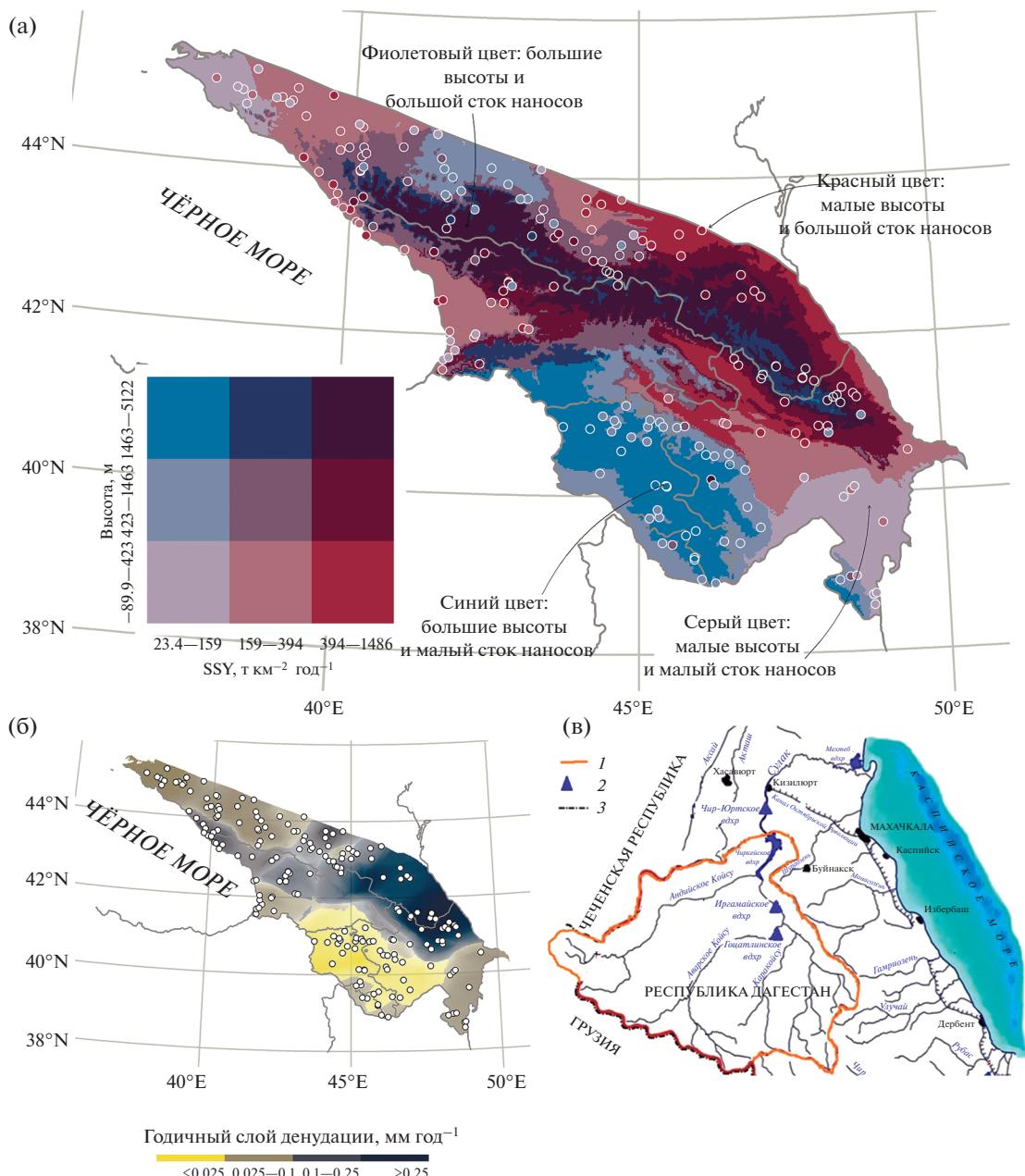
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Возможности пространственных оценок территориального распределения  $SSY$  в пределах различных высотных зон позволяют в первом приближении выявить участки наиболее активно протекающих процессов переноса материала эрозионными процессами (рис. 1а). Следует понимать, что в данном случае не учитывается вклад влекомых наносов, доля которых значительно варьирует от одного речного бассейна к другому в зависимости от набора гидрометеорологических и геолого-геоморфологических факторов. Можно только с высокой долей уверенности утверждать, что в процентном отношении доля влекомых наносов от общего стока наносов максимальна в малых водотоках 1–3 порядков, дренирующих приледниковые области (Turowski et al., 2010). Однако на таких водотоках практически отсутствуют режимные наблюдения за стоком воды и влекомых наносов. Но даже в случае их наличия технически невозможно определить максимальные расходы наносов, которые формируются при прохождении характерных для данных водотоков селей. В

этой связи пространственные закономерности темпов денудации в различных частях Большого и Малого Кавказа, полученные на основе преобразования модулей стока наносов рек с учетом плотности коренных пород, дают общее представление об активности процессов перемещения материала (рис. 1б). Фактические среднемноголетние темпы денудации, несомненно, выше в связи с тем, что используемые оценки стока взвешенных наносов не включают материал, перемещаемый внутри речных бассейнов и переоткладывающийся на поймах и в руслах рек выше измерительного створа, а также расход донных наносов, проходящих через створ.

Общий сток взвешенных наносов, перемещаемых реками Малого и Большого Кавказа, составляет около 98 млн т в год. Это величина получена на основе прямых измерений на 194 гидрометрических постах, которые охватывают 61% от общей площади исследуемого района. Объем стока наносов для остальной части Кавказского региона неохваченного гидрологическими наблюдениями, полученный на основе интерполяции, составляет 50 млн т  $\text{год}^{-1}$  (Tsyplenkov et al., 2019). Среднемноголетний модуль стока взвешенных наносов  $SSY_{cp}$  равен  $446 \text{ т км}^{-2} \text{ год}^{-1}$  (станд. откл. = 618), медианный  $SSY_{med}$  –  $200 \text{ т км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ . Данные величины практически идентичны модулям стока наносов, посчитанным (Vanmaercke et al., 2011) для Альп: среднемноголетний модуль стока  $451 \text{ т км}^{-2} \text{ год}^{-1}$  (станд. откл. = 876,  $SSY_{med} = 198$ ). В целом средние значения  $SSY_{cp}$  выше в пределах северного мегасклона Большого Кавказа ( $504 \text{ т км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ), чем южного мегасклона ( $396 \text{ т км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ). Разница является статистически значимой и не связана с перепадами высот. Кроме того, значения  $SSY_{cp}$  очень низкие ( $<50 \text{ т км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ) на большей части Малого Кавказа в пределах территорий Армении и Азербайджана, особенно в горной степной зоне. Наибольшие значения  $SSY_{cp}$  ( $>1000 \text{ т км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ) наблюдаются в степной зоне Дагестана (Восточный Кавказ), где очень высока антропогенная нагрузка на водосборы, обусловленная перевыпасом скота, что способствует резкому увеличению темпов водной эрозии и других экзогенных процессов. При этом активному поступлению рыхлообломочного материала со склонов в днища долин способствуют характер расчленения рельефа и высокая сейсмичность территории (Golosov and Tsyplenkov, 2021).

Среднемноголетние темпы денудации в регионе (см. рис. 1б) по нашим оценкам составляют  $0.17 \text{ мм год}^{-1}$  с максимумом в  $1.55 \text{ мм год}^{-1}$ . По расчетам, выполненным В. Мозжерином и А. Шарифуллиным (2014), темпы денудационного сноса варьируются от  $0.005$  до  $2.32 \text{ мм год}^{-1}$  на территории Кавказа. Ранее годичный слой денудации



**Рис. 1.** (а) Пространственное распределение среднегодового модуля стока наносов ( $SSY_{cp}$ ,  $\text{т км}^{-2} \text{год}^{-1}$ ) для территории Большого и Малого Кавказа по трем высотным поясам ( $h$ , м), оцененное на основе метода  $k$ -ближайших соседей. Точками показано расположение гидрометрических постов с наблюдениями за расходами воды и мутностью (Tsyplenkova et al., 2019); (б) среднемноголетние темпы денудации для Кавказского региона (Tsyplenkova et al., 2019); (в) водосбор бассейна р. Сулак. 1 – граница водосбора р. Сулак по плотине Чиркейского водохранилища; 2 – водохранилища, упомянутые в табл. 2; 3 – государственная граница РФ.

Кавказ уже оценивался частично А.Ф. Мандычем (1967, 1968), С.А. Ахундовым (1974), Г.Н. Хмаладзе (1964), М.А. Абдуевым (2011) и Г.К. Габриеляном (1971), причем последний для своих расчетов использовал и сток влекомых наносов. По подсчетам Г.К. Габриеляна, годичный слой денудации всего Кавказа составляет 0.2 мм. Во всех случаях пространственное распре-

деление темпов денудации схоже на качественном уровне и повторяет распространение модулей стока наносов.

Выявлены существенно более низкие темпы денудации в пределах Малого Кавказа, где слой денудации в основном составляет менее  $0.025 \text{ мм год}^{-1}$  и не превышает  $0.1 \text{ мм год}^{-1}$ . Относительно равномерное заселение данной территории с умерен-

ной нагрузкой на ландшафты позволяет предложить, что вклад антропогенной составляющей в сток наносов рек здесь невелик. Пространственно-временная вариабельность природных факторов, влияющих на сток наносов здесь также достаточно невысокая (Buchner et al., 2020). При этом характер расчленения рельефа во многом способствует переотложению большей части продуктов денудации внутри междуречных пространств. В этой связи большее внимание в нашем исследовании уделено Большому Кавказу.

Наиболее высокая корреляционная связь с модулями стока наносов рек обнаружена с *HAND* ( $r = 0.52$ ),  $K_{sn}$  ( $r = 0.46$ ) и *BARREN* ( $r = 0.48$ ). Первые два показателя, по существу, отражают характер расчлененности территории и тем самым определяют коэффициент доставки наносов со склонов в днища долин. Доля земель, лишенных растительности (*BARREN*), во многом определяет возможность сноса материала при формировании поверхностного стока, особенно если учитывать, что почва на таких участках отсутствует. Это предопределяет низкую влагоемкость рыхлых отложений на данных участках. Также достаточно хорошая отрицательная корреляционная связь существует между *SSY* и *CWR* ( $r = -0.37$ ). Она достигает высоких значений, если рассматривать только водосборы высокогорной зоны ( $r = -0.65$ ). При этом *CWR* объясняет 64% вариации *SSY* высокогорных водосборов, что понятно, так как эта величина обратно пропорциональна скорости физического выветривания, которое в горах усиливается с высотой. Также хорошая корреляционная связь обнаружена между *SSY* и долей ледников на водосборе ( $r = 0.36$ ) и показателем сейсмичности ( $r = 0.35$ ). Это вполне объяснимо, так как наличие ледников в условиях сокращения их площади предполагает существование перигляциальной зоны, где процессы денудации идут особенно активно (Tsyplenkova et al., 2020, 2021). Сейсмичность стимулирует скорости выветривания, а также локальное перемещение рыхлообломочного материала по направлению к днищам речных долин. В целом, указанные выше геологотопографические показатели значимо влияют на *SSY* во всех высотных зонах Кавказа.

Достаточно парадоксальной только на первый взгляд представляется пусты и сравнительно слабо проявляющаяся отрицательная корреляционная связь между долей пахотных земель и *SSY* ( $r = -0.29$ ). Тем не менее, для горных территорий это объясняется увеличением коэффициентов доставки наносов по мере повышения высоты водосбора над уровнем моря. В предгорьях, несмотря на высокую долю пахотных земель, значительные объемы смыываемого с пашни материала переотлагаются по пути его транспортировки до постоянного водотока. Напротив, в высокогорьях практически вся пашня сосредоточена в днищах

долин, что способствует тому, что практически весь смываемый с пашни материал доставляется в русла рек (Голосов и др., 2015).

Тесная положительная связь между *SSY* и некоторыми климатическими факторами, характеризующими атмосферные осадки (суммарный слой осадков и эрозионный потенциал осадков), выявлена только для высокогорных водосборов ( $r = 0.51$ ). Для остальных высотных поясов и предгорий она проявляется достаточно слабо.

В целом по своей значимости основные показатели, определяющие сток взвешенных наносов рек Кавказа выстраиваются в следующую последовательность *HAND* > *PGA* > *BARREN* >  $K_{sn}$  > > *CROPLAND* > *CWR*. Среди них топографо-геологические факторы являются консервативными в историческом масштабе времени и не могут значимо влиять на тренды стока наносов в масштабе нескольких десятилетий, для которых имеются ряды гидрологических наблюдений. Антропогенно обусловленным является только фактор изменения площади пашни *CROPLAND*. При этом доля территорий, лишенных почвенного покрова (*BARREN*), только отчасти связана с деятельностью человека. В частности, площади бедлендов в ряде регионов Кавказа увеличиваются за счет антропогенно-обусловленного формирования селевых лотков (Шварёв и др., 2021) или перевыпаса домашних животных на участках горных склонов (Ларионов, 1993).

Скорость химического выветривания (*CWR*) во многом определяется климатическими характеристиками, и прежде всего температурно-влажностными показателями. Их изменения во времени сказываются на усилении или ослаблении как химического, так и физического выветривания. Тесная связь между *SSY* и *CWR* установлена только для бассейнов высокогорного пояса Кавказского региона. В целом, это согласуется с известными представлениями о том, что при достижении порогового значения скорости денудации вклад химического выветривания начинает уменьшаться по мере увеличения вклада физического выветривания и денудации в целом (Gabet and Mudd, 2009). Это происходит и в высокогорном пояссе Кавказа, где максимальные *SSY* наблюдаются в приледниковых водотоках, дренирующих обширные перигляциальные зоны (Tsyplenkova et al., 2020, 2021). В этой связи важной характеристикой, влияющей на изменения стока наносов рек высокогорного и отчасти среднегорного пояса, часть водосбора которых имеет и ледниковое питание, является прирост площади перигляциальных зон. Установлено, что для Западного и Центрального Кавказа значительный прирост таких площадей произошел в последнее десятилетие (рис. 2). Причем в Центральном Кавказе рост площадей перигляциальных зон начался еще со второй половины

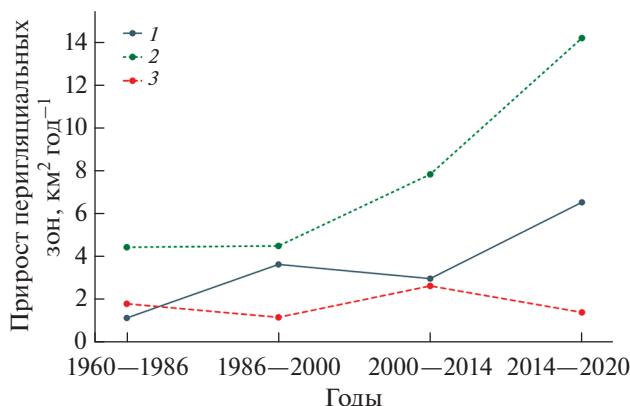


Рис. 2. Изменения прироста площадей перигляциальных зон для различных частей Большого Кавказа: 1 – Западный Кавказ, 2 – Центральный Кавказ, 3 – Восточный Кавказ.

1980-х годов. Совершенно иная ситуация отмечается на Западном Кавказе, где из-за незначительной общей площади ледников прирост перигляциальных зон остается на очень низком уровне (см. рис. 2). В целом, в связи с активизацией таяния ледников Кавказа в ближайшие десятилетия при сохранении существующего климатического тренда следует ожидать постепенного снижения вклада наносов, формирующихся в пределах перигляциальных зон, в сток наносов рек в связи с сокращением темпов их прироста из-за исчезновения ледников. Так, соотношение площади ледников Восточного, Западного и Центрального Кавказа изменилось с 1 : 1.7 : 6.1 в 1960 г. до 1 : 2.5 : 9.8 в 2020 г. соответственно. Вклад ледникового стока в сток наносов рек Восточного Кавказа уже сейчас ничтожно мал и в этом же направлении развивается ситуация на Западном Кавказе.

Результаты мониторинговых наблюдений за стоком приледниковых рек позволяет определить соотношение вклада в формирование их стока наносов ледникового и дождевого стоков воды. Так, длительные наблюдения на трех приледниковых водосборах площадью 100–800  $\text{км}^2$ , расположенных в районе Эрцель в Альпах, позволили оценить вклад дождевого стока в сток наносов в 21%. Остальной объем наносов формируется за счет таяния мертвого льда и языков ледников (Schmidt et al., 2022). Результаты четырехлетних наблюдений за стоком наносов на водосборе р. Адыл-су (Центральный Кавказ) свидетельствуют, что вклад дождевого стока составил порядка 50%, но основной прирост произошел благодаря выносу рыхлообломочного материала, который формируется за счет размыва сравнительно недавно образовавшегося прорана боковой морены ледника Джанкуат (Tsyplenkov et al., 2021).

В последние несколько десятилетий в Кавказском регионе прослеживается тенденция потепления климата, которая проявляется во всех частях региона. Причем повышение летних температур отмечается повсеместно, но тренд повышения зимних температур выявлен только для Черноморского побережья Кавказа и предгорий Восточного Кавказа (Торопов и др., 2018). Общее повышение температур воздуха в некоторой степени способствует возрастанию интенсивности физического выветривания в высокогорном поясе за счет увеличения числа дней с переходами температуры через 0°C (Харченко и др., 2021).

Статистически значимые изменения слоя осадков в период с 1980-х годов до настоящего времени выявлены только для предгорной зоны Восточного Кавказа. Вблизи черноморского побережья установлена тенденция сокращения как интенсивностей, так и месячных сумм осадков в январе–феврале и в летние месяцы, а также значительное увеличение этих показателей в апреле (Торопов и др., 2018). Учитывая, что в апреле наблюдается и таяние снега в низкогорной зоне, это способствует усилению повторяемости схода селей и, тем самым, увеличению стока наносов. Тренд заметного усиления суточной интенсивности осадков выявлен в высокогорной зоне Восточного Кавказа, что на фоне роста интенсивности физического выветривания способствует как усилению темпов поступления наносов со склонов в днища долин, так и росту стока наносов. В целом, можно говорить об увеличении повторяемости отдельных экстремальных ливней в ряде пунктов Кавказского региона (Торопов и др., 2018).

Независимыми от наблюдений за стоком наносов на гидрометрических постах являются данные о заилении водохранилищ, перехватывающих весь (взвешенные и влекомые) сток наносов со всего бассейна. Для северного мегасклона Западного Кавказа ловушкой наносов является Краснодарское водохранилище, созданное на р. Кубань в 1973 г. В водохранилище поступает сток наносов рек, дренирующих большую часть северного мегасклона Западного Кавказа. Среднегодовой сток взвешенных наносов р. Кубань в период 1940–1960 гг. в створе нынешнего водохранилища составлял 8 млн  $\text{м}^3 \text{год}^{-1}$  (Беркович, 2012). После создания водохранилища в нем задерживалось 97–98% наносов, включая взвешенные и влекомые речные наносы, а также продукты размыва берегов самого водохранилища. Темпы заиления водохранилища в период с середины 1980-х годов постоянно сокращаются (рис. 3а). При этом следует учитывать, что продукты размыва берегов водохранилища до настоящего момента вносят заметный вклад в его заиление, а среднегодовые темпы отступания берегов за пе-

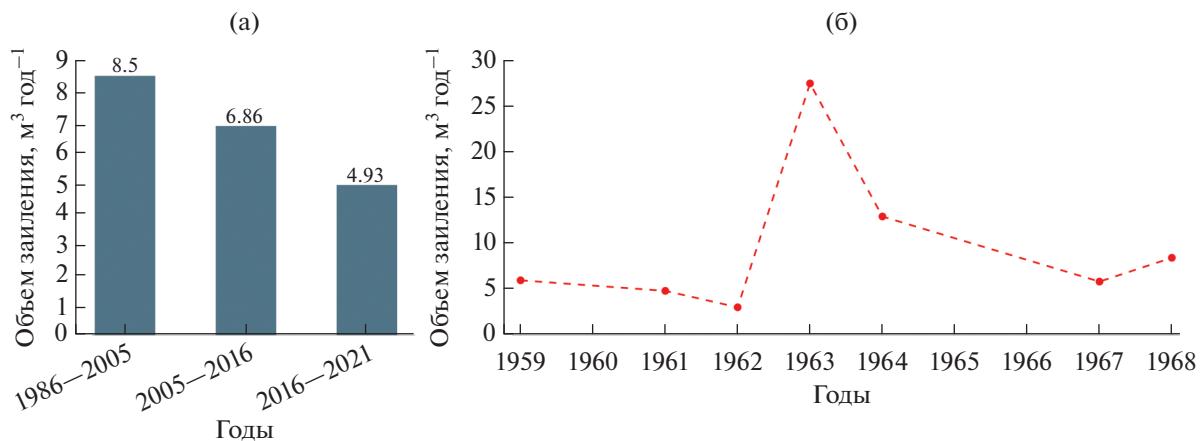


Рис. 3. Динамика заиления (а) Краснодарского (р. Кубань) и (б) Чир-Юртского (р. Сулак) водохранилищ.

приод 2004–2016 гг. составили  $1.5 \text{ м год}^{-1}$  при общей протяженности береговой линии около 100 км (Побелат и Медведев, 2017).

Таким образом, прослеживается отчетливый тренд снижения темпов заиления водохранилища за счет сокращения стока наносов. Годовой слой осадков практически не изменился за последние десятилетия. Снижение объема поступающих наносов связано с сокращением ледникового стока и существенным уменьшением площади пахотных земель в горах, особенно в Адыгее (Buchner et al., 2020).

В пределах Восточного Кавказа наиболее показательны оценки модулей стока наносов, определенные по данным заиления каскада водохранилищ на р. Сулак и ее притоках. Наиболее старое Чир-Юртское водохранилище, созданное в конце 1950-х годов, уже за первое 10-летие своего существования залилось на 90% при среднегодовом модуле стока наносов, составившего  $1282 \text{ т км}^{-2}$  в год (табл. 2). Причем 40% поступивших в водохранилище наносов (рис. 3б) было доставлено

экстремальным паводком 1963 г. (Петров, 2018). В целом, можно говорить о том, что максимальные модули стока наносов характерны для водосбора р. Андийское Койсу, которая является левобережным притоком р. Сулак, впадающим в Чиркейское водохранилище. Для данного водосбора характерен отчетливый тренд роста стока наносов, обусловленный усилением эрозии на пастбищах за счет 40% роста поголовья скота в период с 1990–2014 гг., а также увеличением повторяемости экстремальных ливней (Торопов и др., 2018). На остальной части бассейна р. Сулак сток наносов остается стабильно высоким, но отчетливого тренда роста не выявлено (см. табл. 2).

В бассейне р. Терек, дренирующем северный мегасклон Центрального Кавказа, нет крупных водохранилищ, объемы накопления наносов в которых за разные интервалы времени могли быть использованы для оценки тренда суммарного стока наносов с водосбора. Ранее выполненный детальный анализ трендов изменений  $SSY$  в речных бассейнах различных высотных зон Цен-

Таблица 2. Модули стока наносов на р. Сулак и ее притоках за различные интервалы времени, рассчитанные по данным об объемах заиления на каскаде водохранилищ [по данным (Петров, Саидов, 2019)]

Водохранилище	Начало заполнения, год	Высота плотины над ур. м., м	Период наблюдений	Площадь водосбора, $\text{км}^2$	Модуль стока наносов, $\text{т}/\text{км}^2$ в год
Чир-Юртское	1959	88	1959–1968	13 340	1282
Чиркейское	1974	348	1974–1991	11 290	3189***
Чиркейское*	1974	348	1996–1999	5434	1582
Чиркейское*	1974	348	2000–2013	5434	2542
Ирганайское	1996	546	1996–2008	7320	1566
Ирганайское**	1996	546	2012–2015	4000	1350
Гоцатлинское	2015	650	2015–2016	3320	1626

Примечания. \* После строительства Ирганайского водохранилища; \*\* после строительства Гоцатлинского водохранилища; \*\*\* прирост темпов заиления за счет размыва берегов.

трального Кавказа позволил выявить для большинства рек смену положительного тренда, начавшегося с 1950-х годов, на отрицательный с точкой перелома в период 1988–1994 гг. (Tsyplenkov et al., 2021). При этом синхронность изменений указывает на доминирование влияния изменений природных факторов на *SSY* при подчиненной роли антропогенных, влияние которых в большей степени сказалось на *SSY* некоторых рек предгорно-низкогорного пояса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модуль стока взвешенных наносов рек Кавказского региона в среднем для всего региона составляет 446 т км<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup> и сопоставим с современным стоком рек Альп. При этом денудация существенно выше в пределах Большого Кавказа в сравнении с Малым Кавказом. В свою очередь в пределах Большого Кавказа наблюдается четко выраженный тренд роста *SSY* с Западного Кавказа по направлению к Восточному Кавказу. Здесь он достигает максимальных значений, повсеместно превышая 1000 т км<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>, а во многих бассейнах с учетом и донных наносов, и 1500 т км<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>. Причем если для речных бассейнов Западного и Центрального Кавказа для последних трех десятилетий выявлен в целом отрицательный тренд *SSY*, обусловленный климатическими изменениями, способствующими снижению стока воды и в некоторой степени связанный со снижением нагрузки на пастбища, а для некоторых горных бассейнов и сокращением площади пашни, то *SSY* рек Восточного Кавказа в основном остается неизменным, а в ряде речных бассейнов продолжает увеличиваться. Данный рост обусловлен существенным ростом числа выпасаемых на горных пастбищах домашних животных и увеличении выпадения экстремальных ливней.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда проект № 19-17-00181 (сбор данных, разделы Объект исследования, Методика, Результаты) и в рамках государственного задания НИЛЭПиРП географического факультета МГУ (проект № 121051100166-4) (раздел Обсуждение).

## FUNDING

The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation project no. 19-17-00181 (data collection, sections Object of Study, Methods, Results) and within the framework of the State task of the SLSE&ChP of the Geographical department of Moscow State University (project no. 121051100166-4) (section Discussion).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдуев М.А. Денудация в горных областях Азербайджана по данным о стоке наносов и растворенных веществ // Гидрометеорология и экология. 2011. № 4. С. 122–131.
- Ахундов С.А. Интенсивность денудации Азербайджанской части Кавказа // Геоморфология. 1974. № 3. С. 46–52.
- Беркович К.М. Русловые процессы на реках в сфере влияния водохранилищ. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. 163 с.
- Габриелян Г.К. Интенсивность денудации на Кавказе // Геоморфология. 1971. № 1. С. 22–27.
- Голосов В.Н., Сосин П.М., Беляев В.Р., Вольфрамм Б., Ходжаев Ш.И. Влияние ирригационной эрозии на деградацию почв речных долин в высокогорном поясе Памира // Почвоведение. 2015. № 3. С. 373–384.
- Курбатова И.Е. Мониторинг трансформации Краснодарского водохранилища с использованием спутниковых данных высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 42–53.
- Лагута А.А., Погорелов А.В. Особенности заилиения Краснодарского водохранилища. Опыт оценки по данным батиметрических съемок // Географический вестн. 2018. № 4 (47). С. 54–66.
- Лагута А.А., Погорелов А.В. Трансформация Краснодарского водохранилища (1941–2018 гг.) // Изв. ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2019. № 3. С. 45–54.
- Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
- Маккавеев Н.И., Мандыч А.Ф., Чалов Р.С. Влияние восходящего развития рельефа на глубинную эрозию и твердый сток рек Западной Грузии // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 1968. № 4. С. 52–58.
- Мандыч А.Ф. Величина твердого стока рек Западной Грузии // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 1967. № 3. С. 134–137.
- Мозжерин В.В., Шарифуллин А.Г. Оценка современного денудационного снижения гор по данным о стоке взвешенных наносов рек // Геоморфология. 2014. № 1. С. 15–23.
- Петров О.А. Анализ динамики заилиения Чирюртского водохранилища на р. Сулак // Изв. Всерос. научно-исслед. ин-та гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2018. Т. 290. С. 47–54.
- Петров О.А., Саидов М.А. Анализ динамики заилиения водохранилищ на р. Сулак и ее притоках // Гидротехническое строительство. 2019. № 9. С. 43–47.
- Побелат Д.А., Медведев А.В. Мониторинг переработки берегов Краснодарского водохранилища: сб. статей XI Всерос. конф. молодых ученых, посвященной 95-летию Кубанского ГАУ и 80-летию со дня образования Краснодарского края. Краснодар: Изд-во Кубанский аграрный ун-т, 2017. С. 829–830.
- Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселев Е.Н. Новые сведения о заилиении Краснодарского водохранилища

- по данным батиметрической съемки // Географический вестн. 2022. Т. 61. № 2. С. 166–179.
- Торопов П.А., Алешина М.А., Семенов В.А.** Тенденции изменений климата Черноморско-Каспийского региона за последние 30 лет // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2018. № 2. С. 67–77.
- Харченко С.В., Федин А.В., Голосов В.Н.** Темпы денудации в перигляциальных областях высокогорий: методы и результаты исследований // Геоморфология. 2021. № 1. С. 3–18.
- Хмаладзе Г.Н.** Взвешенные наносы рек Армянской ССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1964. 246 с.
- Чалов С.Р., Терский П.Н., Ефимова Л.Е., Терская А.И., Ефимов В.А., Данилович И.С.** Проблемы гидрологического мониторинга в бассейнах трансграничных рек Восточной Европы (на примере Западной Двины) // Инженерные изыскания. 2019. № 13. С. 32–44.
- Шварев С.В., Харченко С.В., Голосов В.Н., Успенский М.И.** Количественная оценка факторов активизации селей в 2006–2019 годах на склоне хребта Аибга (Западный Кавказ) // География и природные ресурсы. 2021. Т. 42. № 2. С. 41–50.
- Abatzoglou J. T., Dobrowski S. Z., Parks S. A., et al.** Data Descriptor: TerraClimate a High-Resolution Global Dataset of Monthly Climate and Climatic Water Balance from 1958–2015 // Sci. Data. 2018. Vol. 5. Art. 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Al-Chokhachy R., Black T. A., Thomas C., et al.** Linkages between unpaved forest roads and streambed sediment: why context matters in directing road restoration // Res. Ecol. 2016. Vol. 24. P. 589–598. <https://doi.org/10.1111/rec.12365>
- Borga M., Stoffel M., Marchi L., et al.** Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: flash floods and debris flows // J. Hydrology. 2014. Vol. 518B. P. 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022>
- Buchner J., Yin H., Frantz D., et al.** Land-Cover Change in the Caucasus Mountains since Based on the Topographic Correction of Multi-Temporal Landsat Composites // Remote Sens. Environ. 2020. Vol. 248. Art. 111967. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111967>
- Cendrero A., Remondo J., Beylich A. A., et al.** Denudation and geomorphic change in the Anthropocene: a global overview // Earth-Science Reviews. 2022. Vol. 233. Art. 104186. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104186>
- DiBiase R. A., Whipple K. X., Heimsath A. M., et al.** Landscape Form and Millennial Erosion Rates in the San Gabriel Mountains, CA // Earth Planet Sci. Lett. 2010. Vol. 289. P. 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.10.036>
- Gabet E. J., Mudd S. M.** A Theoretical Model Coupling Chemical Weathering Rates with Denudation Rates // Geology. 2009. Vol. 37. P. 151–154. <https://doi.org/10.1130/G25270A.1>
- Garcia-Ruiz J. M., Lasanta T.** Land-use changes in the Spanish Pyrenees // Mountain Research and Development. 1990. Vol. 10. № 3. P. 267–279.
- Garcia-Ruiz J. M., Lana-Renault N.** Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in Europe, with special reference to the Mediterranean region – a review // Agr. Ecosyst. Environ. 2011. Vol. 140. P. 317–338. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.003>
- Giardini D., Grünthal G., Sheldock K. M., Zhang P.** The GSHAP Global Seismic Hazard // Int. Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. 2003. P. 1233–1239.
- Hartmann J., Moosdorf N.** The new global lithological map database GLiM: A representation of rock properties at the Earth surface // Geochem. Geophys. Geosyst. 2012. Vol. 13. Q12004. <https://doi.org/10.1029/2012GC004370>
- Hartmann J., Moosdorf N., Lauerwald R., et al.** Global Chemical Weathering and Associated P-Release – The Role of Lithology, Temperature and Soil Properties // Chem. Geol. 2014. Vol. 363. P. 145–163. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.10.025>
- Hengl T., de Jesus J. M., Heuvelink G. B. M., et al.** SoilGrids250m: Global Gridded Soil Information Based on Machine Learning // PLoS One. 2017. Vol. 12. e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- Kozak J.** Forest cover change in the Western Carpathians in the past 180 years // Mountain Research and Development. 2003. Vol. 23. № 4. P. 369–375. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2003\)023\[0369:FCCR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2003)023[0369:FCCR]2.0.CO;2)
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., et al.** Global Rainfall Erosivity Assessment Based on High-Temporal Resolution Rainfall Records // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. Art. 4175. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
- Potapov P., Li X., Hernandez-Serna A., et al.** Mapping Global Forest Canopy Height through Integration of GEDI and Landsat Data // Remote Sens. Environ. 2021. Vol. 253. Art. 112165. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112165>
- Raup B., Racoviteanu A., Khalsa S. J. S., et al.** The GLIMS Geospatial Glacier Database: A New Tool for Studying Glacier Change // Glob. Planet. Chang. 2007. Vol. 56. P. 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.018>
- Remondo J., Soto J., González-Díez A., et al.** Human impact on geomorphic processes and hazards in mountain areas in northern Spain // Geomorphology. 2005. Vol. 66. P. 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.009>
- Schirpke U., Tasser E., Leitinger G., et al.** Using the Ecosystem Services Concept to Assess Transformation of Agricultural Landscapes in the European Alps // Land. 2022. Vol. 11. № 49. <https://doi.org/10.3390/land11010049>
- Schliep K., Hechenbichler K.** kknn: Weighted k-Nearest Neighbors, 2016.
- Schmidt L. K., Francke T., Rottler E., et al.** Suspended sediment and discharge dynamics in a glaciated alpine environment: identifying crucial areas and time periods on several spatial and temporal scales in the Ötztal,

- Austria // *Earth Surf. Dyn.* 2022. Vol. 10. P. 653–669.  
<https://doi.org/10.5194/esurf-10-653-2022>
- Schwanhart W., Scherler D.*, Bumps in River Profiles: Uncertainty Assessment and Smoothing Using Quantile Regression Techniques // *Earth Surf. Dynam.* 2017. Vol. 5. P. 821–839.  
<https://doi.org/10.5194/esurf-5-821-2017>
- Syvitski J., Restepo-Angel J., Saito Y., et al.* Earth's sediment cycle during the Anthropocene // *Nature Reviews Earth & Environ.* 2022. Vol. 3. P. 179–196.  
<https://doi.org/10.1038/s43017-021-00253-w>
- Tielidze L.G., Nosenko G.A., Khromova T.E., et al.* Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020 // *Cryosphere*. 2022. Vol. 16. P. 489–504.  
<https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022>
- Tielidze L.G., Wheate R.D.* The greater Caucasus glacier inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan) // *Cryosphere*. 2018. Vol. 12. № 1. P. 81–94.  
<https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018>
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M.* Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st century // *Int. J. Climatol.* 2019. Vol. 39. № 12. P. 4703–4720.  
<https://doi.org/10.1002/joc.6101>
- Tsyplenkov A., Golosov V., Belyakova P.* How did the suspended sediment load change in the north Caucasus during the Anthropocene? // *Hydrological Processes*. 2021. Vol. 35. № 10. Art. 14403.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.1403>
- Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Collins A.L., et al.* Elucidating suspended sediment dynamics in a glacierized catchment after an exceptional erosion event: The Djankuat catchment, Caucasus Mountains, Russia // *Catena*. 2021. Vol. 203. Art. 105285.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105285>
- Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Golosov V., et al.* Suspended Sediment Budget and Intra-Event Sediment Dynamics of a Small Glaciated Mountainous Catchment in the Northern Caucasus // *J. Soils Sediments*. 2020. Vol. 20. P. 3266–3281.  
<https://doi.org/10.1007/s11368-020-02633-z>
- Turowski J.M., Rickenmann D., Dadson S.J.* The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: a review of empirical data // *Sedimentology*. 2010. Vol. 57. P. 1126–1146.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2009.01140.x>
- Vanacker V., von Blanckenburg F., Govers G., et al.* Transient River Response, Captured by Channel Steepness and Its Concavity // *Geomorphology*. 2015. Vol. 228. P. 234–243.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.013>
- Vanmaercke M., Poesen J., Verstraeten G., et al.* Sediment yield in Europe: Spatial patterns and scale dependency // *Geomorphology*. 2011. Vol. 130. P. 142–161.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.010>
- Vezzoli G., Garzanti E., Limonta M., et al.* Focused Erosion at the Core of the Greater Caucasus: Sediment Generation and Dispersal from Mt. Elbrus to the Caspian Sea // *Earth-Sci. Rev.* 2020. Vol. 200. Art. 102987.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102987>
- Volodicheva N.* The Caucasus. The Physical Geography of Northern Eurasia / M. Shahgedanova (Ed.). Oxford, UK: Oxford Univ. Press, 2002. P. 350–376.
- Vorosmarty C.J., Meybeck M., Fekete B., et al.* Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments // *Glob. Planet. Chang.* 2003. Vol. 39. P. 169–190.  
[https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00023-7)
- Wiesmair M., Otte A., Waldhardt R.* Relationships between plant diversity, vegetation cover, and site conditions: implications for grassland conservation in the Greater Caucasus // *Biodivers Conserv.* 2007. Vol. 26. P. 273–291.  
<https://doi.org/10.1007/s10531-016-1240-5>
- Wobus C., Whipple K.X., Kirby E., et al.* Tectonics from Topography: Procedures, Promise, and Pitfalls // *GSA Special Papers*. 2006. Vol. 398. P. 55–74.
- Yamazaki D., Ikeshima D., Sosa J., et al.* MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset // *Water Resour. Res.* 2019. Vol. 55. P. 5053–5073.  
<https://doi.org/10.1029/2019WR024873>
- Zalasiewicz J., Waters C.N., Williams M., et al.* When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal: The Quaternary System and its formal subdivision // *Quat. Int.* 2015. Vol. 383. P. 196–203.  
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.11.045>

## Sediment Yield in the Caucasus Mountains and Its Trends as a Reflection of Climate Change and Anthropogenic Impact

V. N. Golosov<sup>1, 2, 3, \*</sup> and A. S. Tsyplenkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

\*e-mail: golosov@gmail.com

The sediment runoff of mountain rivers is an important characteristic that reflects the intensity of denudation in various altitudinal zones, as well as the spatial and temporal features of its changes. The Caucasus region, which includes the Greater and Lesser Caucasus, is characterized by significant territorial contrast associated with differences in the geological and geomorphological structure, seismo-tectonic activity, climate, which together determine the lifestyle of the local population and the features of anthropogenic impact on land-

scapes. The paper presents the results of estimates of the contemporary rates of denudation of the region, obtained on the basis of processing a database on the flow of suspended sediments of rivers at 194 gauge stations with a duration of observations of more than 10 years. To identify the influence of the main natural and anthropogenic factors on the sediment runoff of rivers, calculated and published data on spatially distributed indicators characterizing individual factors or their combinations were used. Statistical processing of dependencies between individual indicators and sediment runoff of rivers was carried out. It has been established that the mean suspended sediment yield (SSY) for the region is  $446 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ . It reaches its maximum values ( $\text{SSY} > 1500 \text{ t km}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ) in the Eastern Caucasus, where it has remained high in recent decades and continues to grow in a number of river basins. For other parts of the Greater Caucasus, a trend of decreasing sediment runoff was revealed, due to a decrease in the glacial supply of rivers and, more locally, a decrease in the area of arable land in the mountains.

**Keywords:** denudation, spatiotemporal analysis, suspended sediments, reservoir sedimentation, bedload, periglacial zone, Caucasus

## REFERENCES

- Abatzoglou J.T., Dobrowski S.Z., Parks S.A., et al. Data Descriptor: TerraClimate a High-Resolution Global Dataset of Monthly Climate and Climatic Water Balance from 1958–2015. *Sci. Data*, 2018, vol. 5, art. 170191.  
<https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Abduev M.A. Denudation in the mountainous regions of Azerbaijan according to the data on the runoff of sediments and dissolved substances. *Gidrometeorol. Ekol.*, 2011, no. 4, pp. 122–131. (In Russ.).
- Akhundov S.A. Intensity of denudation in the Azerbaijan part of the Caucasus. *Geomorf.*, 1974, no. 3, pp. 46–52. (In Russ.).
- Al-Chokhachy R., Black T.A., Thomas C., et al. Linkages between unpaved forest roads and streambed sediment: why context matters in directing road restoration. *Restor. Ecol.*, 2016, vol. 24, pp. 589–598.  
<https://doi.org/10.1111/rec.12365>
- Berkovich K.M. *Ruslovye protsessy na rekakh v sfere vliyaniya reservuarov* [Channel Processes on Rivers in the Sphere of Influence of Reservoirs]. Moscow: Mosk. Univ. Publ., 2012. 163 p.
- Borga M., Stoffel M., Marchi L., Marra F., Jakob M. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: flash floods and debris flows. *J. Hydrol.*, 2014, vol. 518, part B, pp. 194–205.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022>
- Buchner J., Yin H., Frantz D., et al. Land-Cover Change in the Caucasus Mountains since Based on the Topographic Correction of Multi-Temporal Landsat Composites. *Remote Sens. Environ.*, 2020, vol. 248, art. 111967.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111967>
- Cendrero A., Remondo J., Beylich A.A., et al. Denudation and geomorphic change in the Anthropocene; a global overview. *Earth Sci. Rev.*, 2022, vol. 233, art. 104186.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104186>
- Chalov S.R., Tersky P.N., Efimova L.E., Terskaya A.I., Efimov V.A., Danilovich I.S. Problems of hydrological monitoring in the basins of transboundary rivers of Eastern Europe (on the example of the Zapadnaya Dvina). *Inzhenern. Izysk.*, 2019, no. 13, pp. 32–44. (In Russ.).
- DiBiase R.A., Whipple K.X., Heimsath A.M., et al. Landscape Form and Millennial Erosion Rates in the San Gabriel Mountains, CA. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2010, vol. 289, pp. 134–144.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.10.036>
- Gabet E.J., Mudd S.M. A Theoretical Model Coupling Chemical Weathering Rates with Denudation Rates. *Geology*, 2009, vol. 37, pp. 151–154.  
<https://doi.org/10.1130/G25270A.1>
- Gabrielyan G.K. The intensity of denudation in the Caucasus. *Geomorf.*, 1971, no. 1, pp. 22–27. (In Russ.).
- Garcia-Ruiz J.M., Lasanta T. Land-use changes in the Spanish Pyrenees. *Mt. Res. Dev.*, 1990, vol. 10, no. 3, pp. 267–279.
- Garcia-Ruiz J.M., Lana-Renault N. Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in Europe, with special reference to the Mediterranean region – a review. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2011, vol. 140, pp. 317–338.  
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.003>
- Giardini D., Grünthal G., Shedlock K.M., Zhang P. The GSHAP Global Seismic Hazard. In *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, 2003, pp. 1233–1239.
- Golosov V.N., Sosin P.M., Belyaev V.R., Wolfgramm B., Khodzhaev Sh. Effect of irrigation-induced erosion on the degradation of soils in river valleys of the alpine Pamir. *Eurasian Soil Sci.*, 2015, vol. 48, no. 3, pp. 325–335.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229315010056>
- Hartmann J., Moosdorf N. The new global lithological map database GLiM: A representation of rock properties at the Earth surface. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2012, vol. 13, no. 12.  
<https://doi.org/10.1029/2012GC004370>
- Hartmann, J., Moosdorf, N., Lauerwald, R., et al. Global Chemical Weathering and Associated P-Release—The Role of Lithology, Temperature and Soil Properties. *Chem. Geol.*, 2014, vol. 363, pp. 145–163.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.10.025>
- Hengl T., de Jesus J.M., Heuvelink G.B.M., et al. SoilGrids250m: Global Gridded Soil Information Based on Machine Learning. *PLoS ONE*, 2017, vol. 12, art. e0169748.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- Kharchenko S.V., Fedin A.V., Golosov V.N. Denudation rates in periglacial areas of high mountains: methods and results of studies. *Geomorf.*, 2021, no. 1, pp. 3–18. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.31857/S0435428121010065>

- Khmaladze G.N. *Vzveshennye nanosy rek Armyanskoi SSR* [Suspended Sediments of the Rivers of the Armenian SSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1964. 246 p.
- Kozak J. Forest cover change in the Western Carpathians in the past 180 years. *Mt. Res. Dev.*, 2003, vol. 23, no. 4, pp. 369–375.  
[https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2003\)023\[0369:FCTW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2003)023[0369:FCTW]2.0.CO;2)
- Kurbatova I.E. Monitoring the transformation of Krasnodar Reservoir utilizing high resolution satellite data. *Sovrem. Probl. Dist. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2014, vol. 11, no. 3, pp. 42–53. (In Russ.).
- Laguta A.A., Pogorelov A.V. Peculiarities of siltation of the Krasnodar reservoir. Evaluation experience from bathymetric surveys. *Geogr. Vestn.*, 2018, vol. 47, no. 4, pp. 54–66. (In Russ.).
- Laguta A.A., Pogorelov A.V. Transformation of the Krasnodar Reservoir (1941–2018). *Izv. Vyssh. Ucheb. Uchrezhd. Sev.-Kavkaz. Region. Estestv. Nauki*, 2019, no. 3, pp. 45–54. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.23683/0321-3005-2019-3-45-54>
- Larionov G.A. *Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnye zakonomernosti i kolichestvennye otsevki* [Erosion and Deflation of Soils: Basic Regularities and Quantitative Estimates]. Moscow: Mosk. Univ. Publ., 1993. 200 p.
- Makkaveev N.I., Mandych A.F., Chalov R.S. Influence of the ascending development of the relief on deep erosion and solid runoff of the rivers of Western Georgia. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 1968, no. 4, pp. 52–58. (In Russ.).
- Mandych A.F. The value of the sediment runoff of the rivers of Western Georgia. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 1967, no. 3, pp. 134–137. (In Russ.).
- Mozzherin V.V., Sharifullin A.G. Estimation of Current Denudation Rate of the Mountains Based on the Suspended Sediment Runoff of the Rivers (the Tien Shan, the Pamir-Alai, the Caucasus, and the Alps as an Example). *Geomorfol.*, 2015, no. 1, pp. 15–23. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2014-1-15-23>
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. et al. Global Rainfall Erosivity Assessment Based on High-Temporal Resolution Rainfall Records. *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, art. 4175.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
- Petrov O.A. Analysis of the dynamics of silting of the Chiryurt reservoir on the River Sulak. *Izv. Vseross. Nauch.-Iss. Inst. Gidrotekh. Vedeneeva*, 2018, vol. 290, pp. 47–54. (In Russ.).
- Petrov O.A., Saidov M.A. Analysis of the dynamics of silting of reservoirs on the river. Sulak and its tributaries. *Gidrotekhn. Stroitel.*, 2019, no. 9, pp. 43–47. (In Russ.).
- Pobelat D.A., Medvedev A.V. Monitoring of the processing of the banks of the Krasnodar reservoir. In *Sb. statei XI Vseross. Konf. molodykh uchenykh, posvyashchennoi 95-letiyu Kubanskogo GAU i 80-letiyu so dnya obrazovaniya Krasnodarskogo kraya* [Collection of Articles of the XI All-Russian Conf. of Young Scientists Dedicated to the 95th Anniversary of the Kuban State Agrarian University and the 80th Anniversary of the Formation of the Krasnodar Krai]. Krasnodar: Kuban. Agrar. Univ. Publ., 2017, pp. 829–830. (In Russ.).
- Pogorelov A.V., Laguta A.A., Kiselev E.N. New information about the silting of the Krasnodar reservoir according to bathymetric survey data. *Geogr. Vestn.*, 2022, vol. 61, no. 2, pp. 166–179. (In Russ.).
- Potapov P., Li X., Hernandez-Serna A., et al. Mapping Global Forest Canopy Height through Integration of GEDI and Landsat Data. *Remote Sens. Environ.*, 2021, vol. 253, art. 112165.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112165>
- Raup B., Racoviteanu A., Khalsa S.J.S., et al. The GLIMS Geospatial Glacier Database: A New Tool for Studying Glacier Change. *Glob. Planet. Chang.*, 2007, vol. 56, pp. 101–110.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.018>
- Remondo J., Soto J., González-Díez A., et al. Human impact on geomorphic processes and hazards in mountain areas in northern Spain. *Geomorphology*, 2005, vol. 66, pp. 69–84.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.009>
- Schirpke U., Tasser E., Leitinger G., et al. Using the Ecosystem Services Concept to Assess Transformation of Agricultural Landscapes in the European Alps. *Land*, 2022, vol. 11, no. 49.  
<https://doi.org/10.3390/land11010049>
- Schliep K., Hechenbichler K. *kknn: Weighted k-Nearest Neighbors*, 2016.
- Schmidt L.K., Francke T., Rottler E., et al. Suspended sediment and discharge dynamics in a glaciated alpine environment: identifying crucial areas and time periods on several spatial and temporal scales in the Ötztal, Austria. *Earth Surf. Dynam.*, 2022, vol. 10, pp. 653–669.  
<https://doi.org/10.5194/esurf-10-653-2022>
- Schwanghart W., Scherler D. Bumps in River Profiles: Uncertainty Assessment and Smoothing Using Quantile Regression Techniques. *Earth Surf. Dynam.*, 2017, vol. 5, pp. 821–839.  
<https://doi.org/10.5194/esurf-5-821-2017>
- Shvarev S.V., Kharchenko S.V., Golosov V.N., Uspensky M.I. A Quantitative Assessment of Mudflow Intensification Factors on the Aibga Ridge Slope (Western Caucasus) over 2006–2019. *Geogr. Nat. Resour.*, 2021, vol. 42, pp. 122–130.  
<https://doi.org/10.1134/S1875372821020128>
- Syvitski J., Restepo-Angel J., Saito Y. et al. Earth's sediment cycle during the Anthropocene. *Nat. Rev. Earth Environ.*, 2022, vol. 3, pp. 179–196.  
<https://doi.org/10.1038/s43017-021-00253-w>
- Tielidze L.G., Nosenko G.A., Khromova T.E., et al. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020. *Cryosph.*, 2022, vol. 16, pp. 489–504.  
<https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022>
- Tielidze L.G., Wheate R.D. The greater Caucasus glacier inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan). *Cryosph.*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 81–94.  
<https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018>
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Semenov V.A. Trends in climate change in the Black Sea-Caspian region over the past 30 years. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2018, no. 2, pp. 67–77. (In Russ.).

- Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M. Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st century. *Int. J. Climatol.*, 2019, vol. 39, no. 12, pp. 4703–4720.  
<https://doi.org/10.1002/joc.6101>
- Tsyplenkova A., Vanmaercke M., Golosov V., et al. Suspended Sediment Budget and Intra-Event Sediment Dynamics of a Small Glaciated Mountainous Catchment in the Northern Caucasus. *J. Soils Sediments*, 2020, vol. 20, pp. 3266–3281.  
<https://doi.org/10.1007/s11368-020-02633-z>
- Tsyplenkova A., Golosov V., Belyakova P. How did the suspended sediment load change in the north Caucasus during the Anthropocene? *Hydrol. Process.*, 2021, vol. 35, no. 10, art. 14403.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.1403>
- Tsyplenkova A., Vanmaercke M., Collins A.L., et al. Elucidating suspended sediment dynamics in a glaciated catchment after an exceptional erosion event: The Djankuat catchment, Caucasus Mountains, Russia. *Catena*, 2021, vol. 203, art. 105285.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105285>
- Turowski J.M., Rickenmann D., Dadson S.J. The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: a review of empirical data. *Sedimentology*, 2010, vol. 57, pp. 1126–1146.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2009.01140.x>
- Vanacker V., von Blanckenburg F., Govers G., et al. Transient River Response, Captured by Channel Steepness and Its Concavity. *Geomorphology*, 2015, vol. 228, pp. 234–243.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.013>
- Vanmaercke M., Poesen J., Verstraeten G., et al. Sediment yield in Europe: Spatial patterns and scale dependency. *Geomorphology*, 2011, vol. 130, pp. 142–161.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.010>
- Vezzoli G., Garzanti E., Limonta M., et al. Focused Erosion at the Core of the Greater Caucasus: Sediment Generation and Dispersal from Mt. Elbrus to the Caspian Sea. *Earth Sci. Rev.*, 2020, vol. 200, art. 102987.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102987>
- Volodicheva N. The Caucasus. In *The Physical Geography of Northern Eurasia*. Shahgedanova M., Ed. Oxford: Oxford Univ. Press, 2002, pp. 350–376.
- Verosmarty C.J., Meybeck M., Fekete B., et al. Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Glob. Planet. Change*, 2003, vol. 39, pp. 169–190.  
[https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00023-7)
- Wiesmair M., Otte A., Waldhardt R. Relationships between plant diversity, vegetation cover, and site conditions: implications for grassland conservation in the Greater Caucasus. *Biodivers. Conserv.*, 2007, vol. 26, pp. 273–291.  
<https://doi.org/10.1007/s10531-016-1240-5>
- Wobus C., Whipple K.X., Kirby E., et al. Tectonics from Topography: Procedures, Promise, and Pitfalls. *GSA Special Papers*, 2006, vol. 398, pp. 55–74.
- Yamazaki D., Ikeshima D., Sosa J., et al. MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset. *Water Resour. Res.*, 2019, vol. 55, pp. 5053–5073.  
<https://doi.org/10.1029/2019WR024873>
- Zalasiewicz J., Waters C.N., Williams M., et al. When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal: The Quaternary System and its formal subdivision. *Quat. Int.*, 2015, vol. 383, pp. 196–203.  
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.11.045>