

ВЛИЯНИЕ СУММАРНОГО СТОКА НАНОСОВ НА ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДОЛИНЕ РУЧЬЯ ДЖАНКУАТ, БОЛЬШОЙ КАВКАЗ

В.А. Иванов¹, В.Н. Голосов², А.С. Цыпленков³, А.В. Коноплев⁴

^{1,4} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория геохимии природных вод*

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

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Макавеева*

³ *Лэндэкёр Рисерч Ltd., 4410 Палмерстон Норт, Новая Зеландия*

⁴ *Институт радиоактивности окружающей среды Фукусимского университета, Япония*

¹ *Мл. науч. сотр., аспирант; e-mail: viktoro.1998@yandex.ru*

² *Вед. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: gollossov@gmail.com*

³ *Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: atsyplenkov@gmail.com*

⁴ *Проф., д-р биол. наук; e-mail: alexeikonoplev@gmail.com*

В данной статье представлены результаты исследования стока взвешенных и влекомых наносов за современный период и особенности переотложения наносов на участке днища долины, характеризующегося преобладанием аккумуляции для водосбора руч. Джанкуат ($F = 9,1 \text{ км}^2$, $Q_{\text{mean}} = 1,5 \text{ м}^3/\text{с}$). Полевые методы исследований включали прямые измерения стока влекомых наносов с помощью пробоотборника Хелли-Смита, определение среднего диаметра проб влекомых наносов и пойменных отложений, русловых деформаций и темпов аккумуляции на пойме, в том числе с использованием радиоцезиевого датирования, в пределах расширения днища долины. Установлено, что суммарный сток наносов руч. Джанкуат составляет $10,1 \cdot 10^6 \text{ кг/год}$, из которых 13% приходится на сток влекомых наносов. По данным балансовых наблюдений за влекомым стоком 2016 и 2023 гг. и радиоцезиевым датировкам пойменных отложений скорость аккумуляции на пойме в пределах расширения днища долины составляет $4,8\text{--}5,6 \pm 1,0 \text{ мм/год}$ за 120-летний период ее формирования. Объем ежегодных русловых деформаций в пределах того же участка днища за период с 2016 по 2023 г. составляет в среднем 1260 т/год . Девятикратная разница между средним диаметром проб влекомых наносов и медианным диаметром русловых отложений в пределах участка расширения днища долины указывает на то, что основная аккумуляция здесь происходит при экстремальных паводках с расходами воды редкой повторяемости.

Ключевые слова: влекомый сток, ^{137}Cs , баланс наносов, перигляциальные водосборы, водосборы малых рек

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.11

ВВЕДЕНИЕ

Водосборы высокогорных рек являются территориями, наиболее чувствительными к потеплению климата, что связано с активизацией эрозионно-аккумулятивных процессов, обусловленной сокращением площадей, ранее занятых ледниками. Последнее влечет за собой воздействие на ранее покрытую ледниками местность субэкральных условий, что имеет последствия для гидрологических и геоморфологических процессов [Geomorphology..., 2019]. Темпы денудации на приледниковых водосборах существенно выше по сравнению с другими горными водосборами [Koppes, Montgomery, 2009; Hinderer et al., 2013].

Ледники, включая прогляциальные зоны, в период их отступления являются доминирующим источником наносов на многих горных водосборах

[Hallet et al., 1996], что сказывается на стоке наносов в более крупных речных бассейнах [Syvitski, Milliman, 2007; Hinderer, 2012]. В то же время процессы транспорта и переотложения наносов для малых рек с ледниковым питанием имеют резко выраженный неоднородный во времени характер [Hinderer et al., 2013]. По данным [Porto, Callegari, 2021], более 50% годового стока наносов рек приходится на экстремальные гидрологические события. При этом доля влекомого стока для некоторых перигляциальных водосборов Альп может составлять до 50% от суммарного стока наносов [Hinderer et al., 2013]. В свою очередь и сток влекомых наносов может иметь значительную сезонную и суточную вариабельность, что может определять его нелинейную связь с прочими метеорологическим и гидрологическими параметрами [Engel et al., 2024].

В последние десятилетия в горах Кавказа происходит интенсивная дегляциация, что соответствует общемировой тенденции [Zemp et al., 2015], и связанная с этим интенсификация эрозионных процессов [Шарифуллин, 2015]. В период с 2000 по 2020 г. площадь ледников на Большом Кавказе сократилась на $23,2 \pm 3,8\%$ [Tielidze et al., 2022]. В отличие от ряда других горных стран [Hinderer et al., 2013; Gray et al., 2010], данных по стоку влекомых наносов на реках Кавказа критически мало. Регулярный мониторинг стока влекомых наносов на Кавказе проводился только на двух постах: р. Баксан (с. Заюково) (1953–1955), р. Терек (г. Казбеги, наст. время г. Степанцминда, Грузия) (1938–1940), причем только последний из постов расположен на малом горном водотоке со значительной долей площади ледников на водосборе.

Процессы эрозии и транспорта наносов неразрывно связаны с их аккумуляцией, в том числе в ловушках наносов. Ловушками наносов являются геоморфологические элементы эрозионно-аккумулятивных систем, в которых происходит разгрузка значительной части наносов в связи с падением транспортирующей способности временного или постоянного потока из-за снижения уклона русла [Харченко и др., 2023]. Оценки объемов аккумуляции наносов за пост-Чернобыльский период в озере Донгуз-Орун позволяют оценить скорость денудации водосбора озера в 1,2–1,5 мм/год [Кузьменкова и др., 2023]. Но даже в отсутствии приемных водоемов участки днищ долин горных рек играют роль ловушек наносов из-за того, что объем эродированного материала во много раз превышает транспортирующие возможности водных потоков, формирующихся внутри водосбора [Hinderer et al., 2013; Bollati, Cavalli, 2021]. Но оценки объемов аккумуляции в днищах долин высокогорных рек более редки и сложны в реализации из-за высокой динамичности малых водотоков. Таким исследованием является статья [Otto et al., 2009], в которой на основе использования геофизических методов были оценены объемы аккумуляции и датировок отложений, что позволило выявить темпы денудации за последние 10 тыс. лет для водосборов малых и средних рек европейских Альп в 0,5–2,6 мм/год.

На данный момент динамика стока наносов на приледниковых водотоках Кавказа недостаточно изучена, что связано с практически полным отсутствием данных о стоке влекомых наносов. Целью данной статьи является детальное изучение стока влекомых и взвешенных наносов в ручье Джанкуат, их долевого вклада в суммарный сток, а также оценка вклада экстремальных паводков в сток наносов на основе особенностей их переотложения на участке днища долины с преобладанием процессов аккумуляции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Физико-географическая характеристика объекта исследования. Водосбор руч. Джанкуат расположен в приводораздельной части северного склона Главного Кавказского хребта, в верхней части долины р. Адыл-су, правого притока р. Баксан (рис. 1). Основная экспозиция бассейна северо-северо-западная, средняя высота водосбора 3100 м [Цыпленков, 2020]. Эта территория представляет собой типичное альпийское высокогорье с крутыми склонами и многочисленными скальными выходами. Вследствие активных денудационных процессов на склонах, в пределах зон аккумуляции, включая днище долины, доминируют грубообломочные отложения. Средняя и верхняя части водосбора представляют собой гляциально-нивальный ландшафт, тогда как нижняя часть занята луговыми альпийскими ландшафтами [Алейникова, Петрушина, 2011]. Общая площадь бассейна р. Джанкуат в створе гидропоста А (см. рис. 1) равна 9,1 км², на долю ледников приходится около 27% площади водосбора [Tsyplenkov et al., 2020]. Главным ледником бассейна является одноименный ледник Джанкуат, его площадь составляет 2,42 км² [Kedich et al., 2023]. На территории бассейна располагается также три малых ледника, общей площадью 0,5 км²: Койавган, Виатау и Висячий, сток с которых питает ручей Койавган, который дренирует около трети всего водосбора руч. Джанкуат и имеет площадь около 3 км². Оледенение водосбора руч. Койавган составляет порядка 16%, доминирующая экспозиция склонов южная, юго-западная, средняя высота его водосбора составляет 3329 м. Большая часть водосбора Койавгана полностью лишена растительности и сложена грубообломочными отложениями [Kharchenko et al., 2020].

Натурные наблюдения, начавшиеся с 1966 г., показывают, что за последние 55 лет фронт ледника отступил на 545 м, другими словами, скорость его отступления составила 9,9 м/год, в результате чего площадь оледенения бассейна сократилась на 22,5% [Poroynin et al., 2024]. По данным метеонаблюдений, организованных на водосборе, средняя температура воздуха в сезон абляции в днище долины руч. Джанкуат составляет 10,2°C, на леднике Джанкуат – 6,6°C [Торопов и др., 2018]. На основе данных глобального климатического мониторинга было показано, что в сезон абляции для данного водосбора температура воздуха выросла на 1,2°C, если сравнивать периоды 2017–2021 и 1981–2010 гг. [Poroynin et al., 2024]. Среднее суммарное количество осадков за период мониторинга в сезон абляции (2008, 2014–2022) в днище долины руч. Джанкуат (2650 м) составляет 439 мм/год [Kedich et al., 2023].

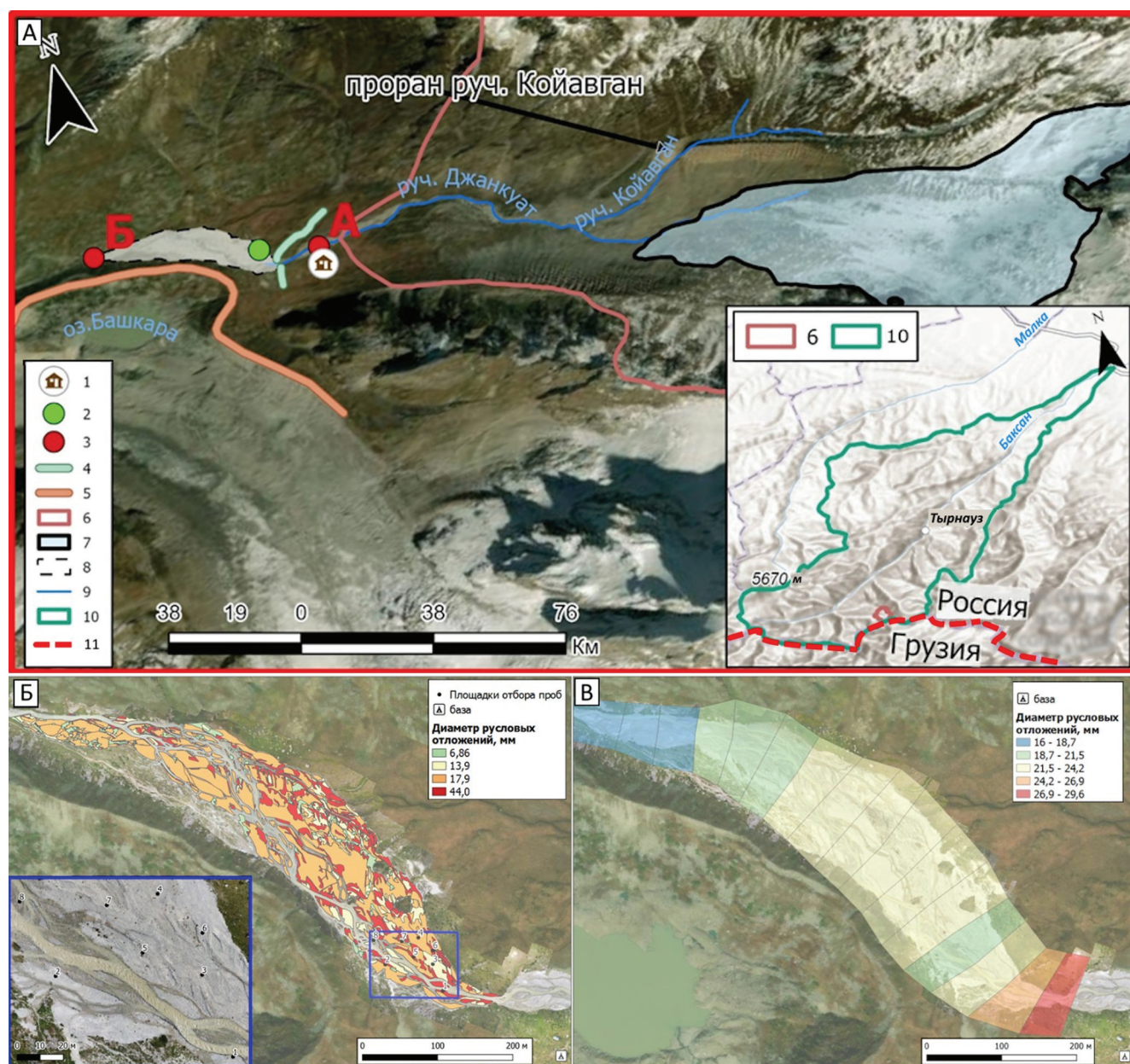


Рис. 1. Схема проведенных работ:

А – карта фактического материала и топонимов: 1 – гляциологическая станция МГУ; 2 – место отбора колонки отложений; 3 – створы измерения влекомых наносов; 4 – морена ледн. Джанкуат, датируемая 1893 г. [Verhaegen et al., 2020]; 5 – морена ледн. Башкара; 6 – водосбор руч. Джанкуат; 7 – граница ледн. Джанкуат на 2017 г. [Rets et al., 2019]; 8 – граница долинного зандра; 9 – русловая сеть водосбора руч. Джанкуат; 10 – водосбор р. Баксан; 11 – Государственная граница РФ; Б – картирование среднего диаметра отложений в пределах расширения днища долины; В – агрегирование среднего диаметра отложений по 50 м

Fig. 1. Fieldwork data:

A – filed materials and toponyms: 1 – glaciological station of Moscow State University; 2 – sediment column sampling site; 3 – bedload measurement points; 4 – moraine of the Dzhankuat glacier 1893 [Verhaegen et al., 2020]; 5 – moraine of the Bashkara glacier; 6 – The Dzhankuat creek watershed; 7 – the border of the Dzhankuat glacier for 2017 [Rets et al., 2019]; 8 – the border of the floodplain; 9 – the channel set of the Dzhankuat creek; 11 – Russian border; 10 – the Baksan river watershed; Б – the diameter of floodplain sediments; В – aggregation of mean sediment diameter by 50 m

Ежедневные наблюдения за стоком воды и взвешенных наносов проводились на ручье Джанкуат во время всего сезона абляции с июня по август в 2015–2017, 2019 и 2023 гг. Эпизодические наблюдения за стоком наносов выполнялись в 2018, 2020,

2021 гг. В 2015, 2016 и 2023 гг. проводились измерения расходов влекомых наносов.

По оценкам [Дюргеров и др., 1972], на период абляции приходится порядка 98% от годового стока взвешенных наносов. Основным источником взве-

шенных наносов для ручья является приледниковая морена (67–79%), материал, вытаявающий из ледника, является вторым по значимости источником (21–33%). В целом, для водосбора руч. Джанкуат за период 2015–2019 гг. около 50% стока наносов было приурочено к ограниченному числу экстремальных гидрологических явлений (1–12% обеспеченности), связанных с выпадением большого количества жидких ливневых осадков [Tsyplenkov et al., 2021].

Событием, наиболее сильно повлиявшим на транспорт наносов руч. Джанкуат за последние как минимум 20 лет, был прорыв правобережной боковой морены ледника Джанкуат в 2015 г. По данным [Kedich et al., 2023], объем образовавшегося прорыва составил порядка 200 тыс. м³. Порядка 25% вынесенного материала переотложилось на конусе выноса притока, большая часть материала поступила в русло р. Джанкуат и частично отложились ниже по течению от участка поступления наносов [Kedich et al., 2023]. При этом неизвестно, какую долю от общего объема перемещенного материала составил растаявший лед.

Для руч. Джанкуат отсутствует какой-либо приемный водоем, но ловушкой наносов служит расширение долины, расположенное ниже моренного вала 1893 ± 20 г. (см. рис. 1). По данным лихенометрических датировок, отложение наносов здесь началось после отступления фронта ледника Джанкуат в 1893 ± 20 г. [Алейникова, Петрушина, 2011; Verhaegen et al., 2020]. Снижение уклона продольного профиля ручья на данном участке площадью 70 170 м², связано с выходами трудноразмываемых кристаллических интрузивных пород (гранитов, гранодиоритов) [Черноморец и др., 2007]. В результате происходит распластывание потока по днищу долины с образованием множества рукавов, что ведет к падению транспортирующей способности потока и, как следствие, приводит к отложению материала, транспортируемого речным потоком.

Методы оценки суммарного стока наносов. Срочные наблюдения за оптической мутностью воды в период абляции проводились на гидрологическом посту А (см. рис. 1). В состав мониторинга входит измерение уровня, температуры, минерализации и оптической мутности воды с периодичностью семь измерений в день. Выбор времени сроков наблюдений предполагает охват пика поступления мутных талых ледниковых вод с 9:00 до 23:00. В период между наблюдениями производится линейная интерполяция значений.

Оптическая мутность приводится к значению массовой мутности с использованием устойчивой многолетней зависимости для данного поста [Tsyplenkov et al., 2020]. В результате получена зависимость:

$$SSC = \begin{cases} 19 - 0,217T + 0,00226T^2, & T < 1000 \\ -566 + 1,21T, & T \geq 1000 \end{cases}, \quad (1)$$

где SSC – весовая мутность, мг/л; T – оптическая мутность, NTU – HACH 2100P.

Мониторинг расходов воды на посту руч. Джанкуат проводился методом ионного паводка на участке русла выше долинного заандра в створе гидрологического поста А. В качестве трассера использовался выпуск 10 л пробы раствора соли с электропроводностью около $70 \cdot 10^{-3}$ мкСм/см, что на порядок выше фоновых значений в потоке. Створ измерения расходов находился в 100 м от места выпуска пробы, предполагается, что на данном расстоянии происходит полное перемешивание.

В среднем расход воды измеряется один раз в пять дней дважды. Измерение уровней производится автоматически с использованием самописца Keller 104, после чего по построенным для каждого месяца отдельным кривым зависимости расходов воды от уровней производится оценка расхода воды на каждые 15 минут установки самописца. Расход взвешенных наносов R (кг/с) вычисляется по формуле:

$$R = Q \cdot SSC, \quad (2)$$

где Q – расход воды, м³/с, SSC – мутность, кг/м³.

Наблюдения за стоком влекомых наносов производились в 2016, 2017 и 2023 гг. параллельно на двух створах (см. рис. 1) с помощью ловушки Хелли – Смита [Helley, Smith, 1971]. Ловушка погружалась в поток на 5 минут. Полученные пробы наносов просушивались в муфельной печи (5 часов при температуре 105°C) и взвешивались. Расчет расхода влекомых наносов подсчитан по формуле:

$$G = \frac{M}{\Delta t} \cdot \frac{B}{b}, \quad (3)$$

где M – масса сухого вещества в ловушке, кг; Δt – время установки ловушки в поток, с (5 минут); B – ширина реки, м; b – ширина ловушки (0,25 м).

В пробах влекомых наносов были измерены медианные диаметры наносов методом ситования. Всего было выполнено 55 измерений расходов влекомых наносов на посту А и 10 измерений на посту Б.

Изучение аллювиальных отложений в расширении днища долины руч. Джанкуат в пределах заандра. В августе 2023 г. для оценки медианного диаметра отложений в пределах расширения днища долины, расположенного между гидростворами А и Б (см. рис. 1А) было выделено четыре категории пойменных отложений с визуальным различием диаметром, для которых было размечено восемь площадок, по две на каждую категорию (см. рис. 1Б).

Измерение диаметра наносов велось в границах площадок, которые были определены при помощи квадратной рамки со стороной 1 м. В поле при по-

мощи линейки были оценены средние диаметры всех обломков более 1,5 см для $\frac{1}{4}$ площади рамки, которые лежали на поверхности. Выборка для каждой площадки составила порядка 6–212 обломков. Диаметр наносов менее 1,5 см был оценен в отобранных пробах мелкозема в лаборатории с помощью набора сит (0,05/0,1/0,25/0,5/1/3 см). Для каждой площадки была оценена доля мелкозема, что позволило рассчитать среднее значение для площадки путем суммирования среднего диаметра крупных обломков и мелкозема в соответствии с занимаемой площадью внутри всей рамки. Для экстраполяции оценок средневзвешенных диаметров наносов, определенных для площадок, была

выполнена съемка БПЛА DJI Mini зандра с высоты в 30 м. Фотограмметрическая обработка снимков была проведена в программе Agisoft Metashape, размер пикселя составил 3 см. Дешифрирование полученного ортофотоплана с учетом отображения на нем ранее исследованных площадок позволило выделить внутри днища долины однородные участки по выбранным четырем категориям (рис. 2). Медианный диаметр русловых отложений для всего исследованного участка днища был оценен как взвешенное среднее диаметров наносов на площадках в зависимости от доли площади, которую занимает каждая группа по крупности русловых наносов.

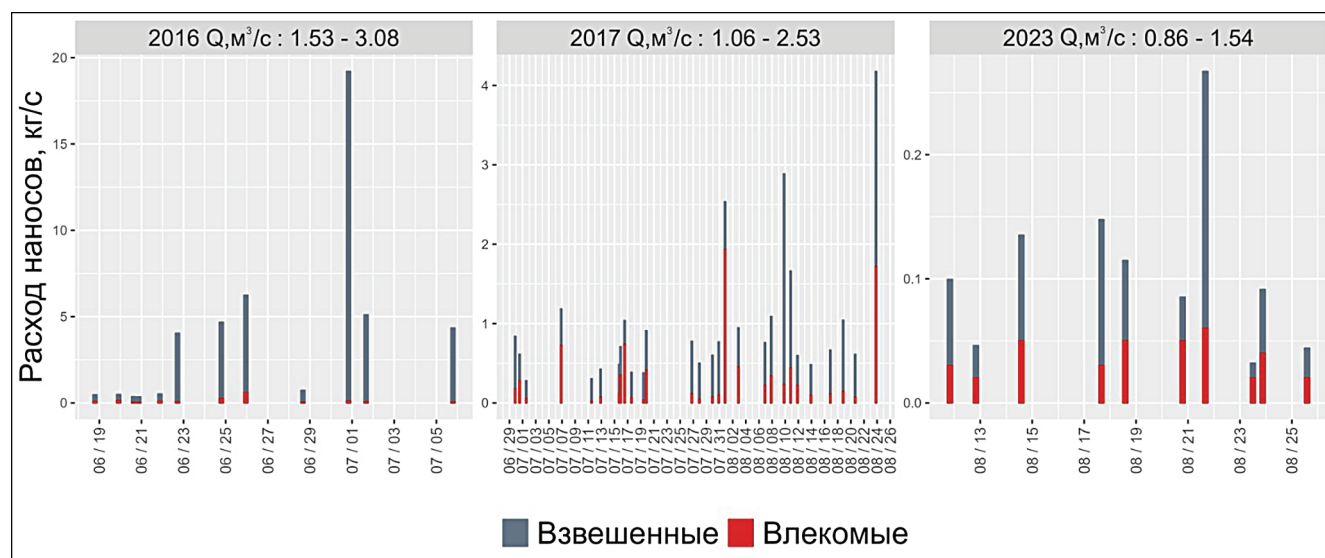


Рис. 2. Соотношение между расходами взвешенных и влекомых наносов при разных расходах воды

Fig. 2. The ratio between the bed load and suspended load at different water discharge

Карта современного вреза русел ручья Джанкуат в пределах исследованного участка днища долины была построена по цифровой модели местности, созданной по данным съемок с БПЛА. Параметры врез русел рассчитаны при помощи инструмента Terrain Profile в QGIS. Полученные результаты были валидированы по натурным измерениям вреза гидрологической штангой по 156 точкам. Средняя ошибка цифровой модели местности в таком случае составила 16%.

Любительские фотографии днища долины руч. Джанкуат, выполненные с ледника Джанкуат с расстояния около 2 км и высоты 150 м, позволили восстановить изменения в положении основного русла ручья в пределах исследованного расширения днища за период с 1981 по 2023 г. Всего для анализа было использовано 17 фотографий. Все фотографии были привязаны с помощью программного комплекса ArcGIS к ортофотоплану, построенному

по данным съемок с БПЛА. Для привязки использовались естественные ориентиры, выступы кристаллических горных пород, положение строений. Привязка включала в себя поиск минимум 20 референсных точек.

Для оценки объема русловой эрозии в пределах расширения днища долины была использована формула:

$$W_b = \frac{L_{\text{разм}} \cdot B \cdot H \cdot \rho}{\Delta t}, \quad (4)$$

где W_b – объем русловых деформаций, кг/год; $L_{\text{разм}}$ – длина фронта размыва, м; B – отступление берега, м; H – средняя глубина вреза русла, м; ρ – плотность грунта кг/м³; Δt – временной промежуток, годы.

Для оценки темпов аккумуляции за исторический период в 2017 г. была отобрана колонка пойменных отложений в пределах исследованного участка днища долины (см. рис. 1). Глубина колонки составила 40 см. Слои были отобраны

через каждые 5 см с площади 15х15 см. Все образцы высушивались при температуре 105°С, далее взвешивались и гомогенизировались (расстирались в ступе до размера <2 мм) в лаборатории. Измерения концентраций ¹³⁷Cs в подготовленных пробах грунта (около 90 г) проводили на коаксиальном германиевом гамма-спектрометре фирмы ООО НИИП «Грин стар инструментов» (СКС-07(09) П-Г-Р, Россия) с относительной погрешностью определения удельной активности 5–10%. Исходя из сухой массы образца и ее фиксированных геометрических параметров, рассчитывались запасы ¹³⁷Cs (кБк/м²) для каждого интервала глубин, где производили измерения [Иванов и др., 2016].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ суммарного стока наносов по данным наблюдений 2015–2023 гг. На основе срочных наблюдений в сезоны абляции 2015–2017, 2019 и 2023 гг. был восстановлен ход стока взвешенных

наносов (табл. 1). По данным совместных измерений расходов воды и мутности, значение суммарного стока взвешенных наносов изменялось в диапазоне от 3·10⁶ до 16·10⁶ кг/год при среднегодовом стоке воды от 10 до 18 млн м³/год (табл. 2). Среднегодовое значение расхода взвешенных наносов составляет 1 кг/с. В период наблюдений наибольшая водность отмечена в 2015 г., когда сток воды за период абляции составил 18·10⁶ м³/год, а максимальный суточный расход воды достигал значения в 8,46 м³/с. Расход взвешенных наносов данного года составил 16,2·10⁶ кг/год, что вдвое превышает среднегодовые значения и в 5 раз годовой сток наносов 2019 г. (табл. 3).

По всем измерениям влекомых наносов на посту А среднее значение составляет 0,16 кг/с, минимальное значение – 0,01 кг/с, максимальное 1,93 кг/с. В зависимости от измерений вклад стока влекомых наносов в общий сток наносов составляет от 1 до 76%, причем с ростом расходов взвешенных наносов происходит уменьшение доли влекомых (см. рис. 2).

Таблица 1

Характеристика суточных измеренных значений стока наносов руч. Джанкуат за сезоны абляции

Год	T, °C	Осадки, мм	Q _А , м³/с	SSC _А , мг/л	R _А , кг/с	G _А , кг/с	D _{50А} , мм	G _Б , кг/с	D _{50Б} , мм	(R+G), кг/с	G/(R+G)	Аккумуляция, кг/с
2015	10,7	–	2,10	536	1,87	–	–	–	–	–	–	–
2016	8,98	–	1,77	594	1,30	0,10	4,16	0,03	2,10	–	0,07	0,06
2017	11,4	–	1,40	548	0,89	0,34	2,96	–	–	–	0,28	–
2019	9,40	–	1,16	273	0,35	–	–	–	–	–	–	–
2023	10,7	–	1,21	402	0,61	0,04	2,42	0,02	3,18	–	0,41	0,01
Все годы	10,2	–	1,53	471	1,0	0,16	3,18	0,03	2,64	–	0,25	0,04

Примечание: T – среднесуточная температура воздуха; Q_А – расход воды на посту А; SSC_А – мутность; R_А – расход взвешенных наносов; G_{А,Б} – расход влекомых наносов на постах А и Б; D_{50А,Б} – средний диаметр влекомых наносов на постах А и Б; (R+G) – суммарный сток наносов; G/(R+G) – доля влекомого стока

Таблица 2

Характеристика суммарного стока наносов руч. Джанкуат за сезоны абляции

Год	T, °C	Осадки, мм	Q _А , м³/с	SSC _А , мг/л	R _А , кг/с	G _А , кг/с	D _{50А} , мм	G _Б , кг/с	D _{50Б} , мм	(R+G), кг/с	G/(R+G)	Аккумуляция, кг/с
Суммарные величины за сезон абляции												
2015	–	511	18,1·10 ⁶	–	16,2·10 ⁶	2,42·10 ⁶	–	–	–	18,6·10 ⁶	0,15	1,87·10 ⁶
2016	–	570	15,5·10 ⁶	–	11,4·10 ⁶	1,72·10 ⁶	–	–	–	13,1·10 ⁶	0,15	0,97·10 ⁶
2017	–	482	13,0·10 ⁶	–	8,30·10 ⁶	0,75·10 ⁶	–	–	–	9,05·10 ⁶	0,09	0,33·10 ⁶
2019	–	536	10,0·10 ⁶	–	3,00·10 ⁶	0,61·10 ⁶	–	–	–	3,61·10 ⁶	0,20	0,25·10 ⁶
2023	–	746	10,9·10 ⁶	–	5,50·10 ⁶	0,46·10 ⁶	–	–	–	5,96·10 ⁶	0,08	0,14·10 ⁶
Все годы	–	569	13,5·10 ⁶	–	8,86·10 ⁶	1,19·10 ⁶	–	–	–	10,1·10 ⁶	0,13	0,71·10 ⁶

Таблица 3

Минимальные и максимальные значения стока наносов руч. Джанкуат за сезоны абляции

Год	T, °C	Осад- ки, мм	Q_A , м³/с	SSC_A , мг/л	R_A , кг/с	G_A , кг/с	D_{50A} , мм	G_B , кг/с	D_{50B} , мм	$(R+G)$, кг/с	$G/(R+G)$	Аккумуля- ция, кг/с
<i>Минимальные суточные величины за сезон абляции</i>												
2015	4,90	0	0,11	213	0,02	–	–	–	–	–	<0,01	0
2016	–2,70	0	0,46	214	0,10	0,01	0,56	0,01	0,50	–	<0,01	0
2017	2,70	0	0,35	214	0,07	0,05	1,38	–	–	–	<0,01	0
2019	2,14	0	0,01	213	<0,01	–	–	–	–	–	<0,01	0
2023	–1,13	0	0,45	213	0,01	0,02	0,25	0,01	0,32	–	<0,01	0
Все годы	–2,70	0,0	0,01	213	<0,01	0,01	0,25	0,01	0,32	–	<0,01	0,00
<i>Максимальные суточные величины за сезон абляции</i>												
2015	16,8	56,9	8,46	43 300	367	–	–	–	–	–	–	3,40
2016	15,3	40,3	4,45	8 850	39,4	0,54	10,0	0,06	3,86	–	0,28	0,69
2017	17,6	97,2	3,21	53 800	173	1,93	52,5	–	–	–	0,76	0,15
2019	18,1	40,9	3,62	2 260	8,17	–	–	–	–	–	–	0,46
2023	19,3	117	2,29	10 900	95,9	0,06	7,62	0,06	12,8	–	0,62	0,12
Все годы	19,3	117	8,46	53 800	60,8	1,93	52,5	0,06	12,8	–	0,76	3,40

При переходе значений расходов воды через значение в 2,5 м³/с наблюдается скачкообразный рост суммарного расхода наносов (см. рис. 2). Это может быть связано с достижением руслоформирующего расхода воды, что приводит к резкой активизации процессов эрозии дна и бортов русла. В то же время при высоких расходах воды возможно возрастание доли взвешенных наносов за счет перехода части влекомых во взвешенные. Данные экстремальные события обычно приурочены к выпадению обильных ливневых осадков, что в свою очередь приводит к насыщению потока продуктами эрозии, поступающими с водосбора [Tsyplenkov et al., 2020]. Измерения высоких расходов воды могут иметь значительные погрешности. Данные значения выбиваются из общей зависимости расхода влекомых наносов от расхода воды. Поэтому во избежание крупных просчетов, для расходов воды выше 2,5 м³/с использовалось наибольшее измеренное значение в 0,53 кг/с (рис. 3).

Исключая данные пиковые значения, в диапазоне расходов воды от 0,85 до 2,5 м³/с (78% всего периода абляции) существует устойчивая многолетняя зависимость между расходом воды и расходом влекомых наносов, которая имеет вид экспоненты (рис. 4). При низких расходах воды, меньше 0,85 м³/с (13% всего времени абляции), большая часть стока наносов обусловлена перемещением только донных наносов. Предполагается, что дальнейшее снижение расходов воды способствует линейному снижению расходов влекомых наносов до нулевых значений.

В свою очередь повышение расходов воды свыше 2,5 м³/с обычно связано с увеличением скорости таяния или ливневыми осадками, что приводит к поступлению в русло водотока большого количества мелкой взвеси. На долю расходов воды свыше 2,5 м³/с приходится 9% от всей продолжительности периода абляции. Опираясь на данные положения, была предложена составная зависимость расходов воды и влекомых наносов, использованная для интерполяции значений влекомого стока на периоды, неохваченные наблюдениями:

$$G = \begin{cases} Q < 0,85; & 0,0235Q \\ 1 < Q < 2,5; & 0,0036 \exp(2,0269Q) \\ 2,5 < Q; & 0,53 \end{cases} \quad (5)$$

Было рассчитано, что среднемноголетние значения суммарного стока влекомых наносов за период абляции варьируют в диапазоне от $0,46 \cdot 10^6$ кг/год до $2,42 \cdot 10^6$ кг/год, а среднее значение составляет $1,19 \cdot 10^6$ кг/год. Наибольшие значения годового стока наносов приурочены к годам наибольшей водности 2015 и 2016 гг. (см. табл. 3). На даты с среднесуточными расходами воды менее 2,5 м³/с, приходится в среднем 15% от суммарного стока влекомых наносов за период абляции. Минимальные значения (4,4%) наблюдаются для максимального по водности года – 2015-го. Максимальные значения в 27% приурочены к 2023 г. – году с одной из минимальных водностей.

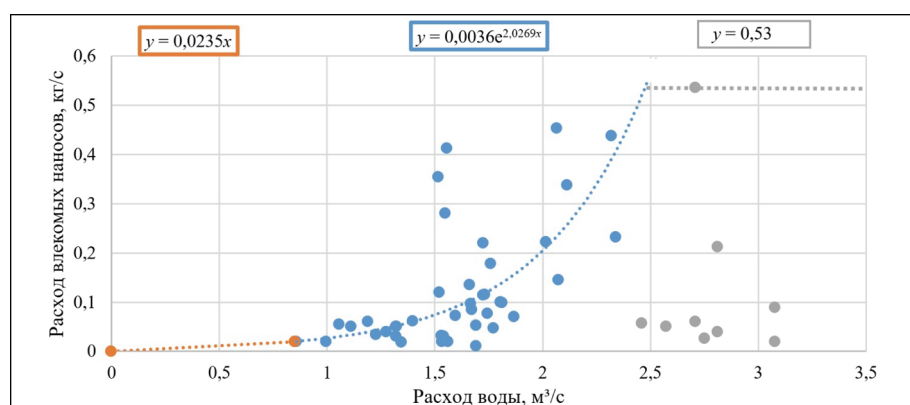


Рис. 3. График связи расходов воды и влекомых наносов

Fig. 3. The relationship between water runoff and bedload

Исходя из расчетов, среднегодовой суммарный сток наносов составляет $10,1 \cdot 10^6$ кг/год. Для поста А доля влекомых наносов в годовом стоке наносов составляет 13%, минимальное значение – 8%, максимальное – 20%. Наибольшее значение доли влекомого стока в 20% приходится на наименьший по водности 2019 г. Наименьшие значения доли влекомого стока в 8 и 9% приурочены к годам «средней» водности (2023 и 2017).

По данным натурных измерений в состав влекомых наносов входят частицы диаметром от менее 0,5 мм до 20 см и более. Средний диаметр частиц влекомого стока составляет 3,18 мм (песок – мелкий гравий), максимальные значения достигают 52,5 мм, минимальные – 0,20 мм. С увеличением расходов воды происходит увеличение диаметра переносимых наносов. При расходах воды менее 1 м³/с медианное значение диаметра составляет 0,24 мм, при расходах воды более 3,5 м³/с – 4,24 мм.

В 2016 и 2023 гг. было проведено десять синхронные измерения влекомых наносов на постах А и Б (см. рис. 1). Было выявлено, что для поста Б среднее значение расхода влекомых наносов равно 0,03 кг/с, что в среднем на 15% меньше, чем на посту А; средний диаметр наносов составляет 2,64 мм, что в среднем на 40% меньше, чем на посту А (см. табл. 1).

По данным измерениям можно вывести зависимость между расходом воды и балансом наносов в пределах участка расширения днища долины, где преобладают процессы переотложения наносов ($G_A - G_B$). Коэффициент детерминации между данными параметрами составляет 0,70, а уравнение связи имеет вид (6).

$$(G_A - G_B) = \begin{cases} Q > 1; & 0,0918Q^2 - 0,1704Q + 0,08 \\ Q < 1; & 0 \end{cases} \quad (6)$$

Расчет по уравнению (6) показывает, что годовой баланс влекомых наносов на участке положительный и имеет значение в $0,71 \cdot 10^6$ кг/год, что состав-

ляет порядка 60% от расхода влекомых наносов на гидростворе А. При минимальном и максимальном значениях в $0,14 \cdot 10^6$ кг/год и $1,87 \cdot 10^6$ кг/год, соответственно. Это говорит о том, что при исследованных расходах воды в пределах расширения днища долины происходит активная аккумуляция наносов. При переходе к размерностям геологических скоростей осадконакопления по формуле (7) можно говорить о том, что для данного участка за счет отложения влекомых наносов скорость аккумуляции по всей его площади составляет 4,8 мм/год.

$$u = \frac{(G_A - G_B)}{\rho_n S_3} \cdot 0,0864, \quad (7)$$

где u – скорость осадконакопления на зандре, мм/год; ρ_n – плотность наносов, кг/м³; S_3 – площадь зандра, м²; G – расход влекомых наносов по постам А и Б, кг/с; 0,0864 – множитель для перехода к размерности мм/год.

Анализ русловых отложений в пределах участка расширения днища долины. По данным съемки БПЛА в августе 2023 г. падение высот в пределах исследованного участка расширения днища долины составляло 40 м/км. Уклон изменялся в диапазоне от 0,005 до 0,085, увеличиваясь вниз по течению. По данным натурных наблюдений установлено, что средняя глубина вреза русел ручья руч. Джанкуат, прорезающих участок расширения днища долины, составляла 43 см с вариабельностью в диапазоне 20–55 см и максимальными значениями до 110 см.

На 65% площади участка отсутствует растительный покров; 13% занимают области с более плотным травянистым покровом, где, вероятно, долгое время не отлагались крупные наносы, но присутствуют временные водотоки и происходит отложение мелкой фракции; 22% площади занимает открытая водная поверхность. Медианный диаметр русловых отложений в пределах исследованного участка руч. Джанкуат составляет 22 мм,

мелкая галька с гравием. Большую часть занимают отложения диаметром 17,9 мм (60%), меньше всего – 6,86 мм (6%). Средняя плотность отложений на участке расширения днища долины была оценена на основе данного распределения диаметра отложений по таблицам [Караушев, 1977] и была принята за 2100 кг/м^3 .

Транспорт наносов и русловые деформации. В результате восстановления положения основного

русла потока за период 1981–2023 гг. было установлено, что пояс русловых деформаций за последние 18 лет равен ширине днища долины, которая в самом широком месте составляет 130 м (рис. 4). Наиболее активными русловыми переформированиями характеризуются верхние 200 м днища долины. Ниже по течению происходит новое слияние проток в единое русло у правого борта долины в 160 м от участка сужения русла, где расположен створ Б.

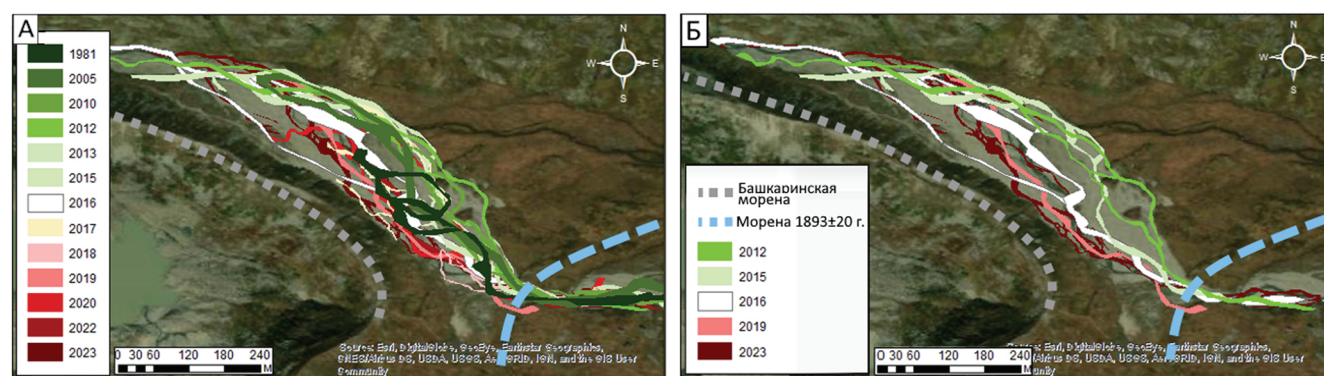


Рис. 4. Положение русла на исследованном участке днища долины в конце периода абляции руч. Джанкуат в период 1981–2023 гг. (А) и в годы наиболее существенных перестроек (Б)

Fig. 4. Channel mitigation of the Djankuat creek 1981–2023 (at the end of ablation period) (А) and at the moment of most essential channel changes (Б)

До 2012 г. основной рукав ручья располагался у правого борта долины, значительно большая часть воды уходила в него сразу после пересечения морены 1893 ± 20 г., но ежегодно русло все дальше отходило от правого борта долины к левому. Наиболее существенная перестройка русла произошла в 2016 г., на следующий год после формирования прорана на правом борту долины руч. Джанкуат (см. рис. 4Б). На текущий момент основной рукав вплотную приблизился к Башкаринской морене.

После 2016 г. расположение основного русла мало менялось на нижнем и верхнем 200-метровых участках расширения днища долины. При этом в его центральной части суммарное смещение русла за счет размыва левого берега составило 30 м ($4,2 \text{ м/год}$) на центральном 350-метровом участке в период с 2016 по 2023 г. (см. рис. 4Б). Учитывая, что средняя глубина вреза русла составила 0,4 м, а плотность отложений – 2100 кг/м^3 , объем ежегодных русловых деформаций в пределах участка, рассчитанный по формуле (4), составляет порядка 1260 т/год .

Аккумуляция наносов на пойме по данным радиоцезиевых датировок и стока влекомых наносов. По данным отбора колонки пойменных отложений средняя удельная активность проб составляет $5,6 \text{ Бк/кг}$. На глубине 5–10 и 30–35 см расположены

два пика активности в 6,6 и 13 Бк/кг соответственно. Предположительно эти пики могут характеризовать поверхность поймы на момент выпадения ^{137}Cs из атмосферы в результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г., и максимум испытаний ядерного оружия в открытой атмосфере (1963 г.), которые проводились в период 1954–1963 гг. [Handbook..., 2003]. Исходя из этих данных можно говорить о том, что в период с 1986 по 2017 г. скорость аккумуляции составляла около $1,5\text{--}1,6 \text{ мм/год}$, за период с 1963 по 1986 г. – $10\text{--}11 \text{ мм/год}$. Как было сказано ранее, радиоцезиевые датировки имеют погрешности порядка 10–15%, поэтому можно говорить о том, что за весь период с 1960 по 2017 г. скорость аккумуляции на исследуемом участке днища долины составляла $5,6 \pm 1,0 \text{ мм/год}$.

Сравнение данных о стоке наносов руч. Джанкуат с другими водосборами. Для характеристики темпов денудации территории обычно используют балансовые методы, заключающиеся в оценке источников поступления наносов, их транспорта и переотложения. Среднемноголетние темпы денудации для Северного Кавказа по данным измерения мутности воды на постах Росгидромета колеблются в диапазоне $0,1\text{--}0,25 \text{ мм/год}$ [Tsyplenkov et al., 2019; Мозжерин, Шарифуллин, 2014]. Недостатком данных оценок является недоучет сто-

ка влекомых наносов, который, в свою очередь, как это было показано в статье [Hinderer et al., 2013] для перигляциальных водосборов малых и средних рек Альп, может варьировать в интервале от 1 до 50% и в среднем составляет 17%. Как было показано в нашем исследовании для руч. Джанкуат доля влекомого стока составляет 13% в диапазоне расходов воды 0,5–3 м³/с, который является характерным для последних лет.

Для сравнения полученных результатов имеет смысл обратиться к имеющимся измерениям стока влекомых наносов на Кавказе. Мониторинг влекомых наносов для малых перигляциальных водосборов Кавказа проводился только на р. Терек (в г. Казбеги, наст. время г. Степанцминда, Грузия) в период с 1938 по 1940 г. Гидрометеорологической службой СССР за год производилось 37–47 наблюдений в течение всего года. Измерения производились с помощью сетчатого мешка в 3–5 точках по поперечному сечению русла. Водосбор Терека, г.п. г. Казбеги, имеет площадь 778 км² (в 85 раз больше руч. Джанкуат), среднегодовые расходы воды 67 м³/с (в 6 раз больше руч. Джанкуат), оледенение бассейна 6,36% (в 3,5 раза меньше р. Джанкуат) [Северный..., 1973]. Результаты мониторинга показывают, что суммарный сток наносов составляет $308 \cdot 10^6$ кг/год (в 30 раз больше чем на руч. Джанкуат), в свою очередь на сток влекомых наносов приходится 22%, что в 1,6 раза превышает значения, полученные при измерении влекомого стока на руч. Джанкуат, среднеквадратичное отклонение данных показателей близко у обоих водотоков 0,12 и 0,13 соответственно.

В литературе распространена эмпирическая зависимость для оценки доли стока влекомых наносов от площади водосбора F (км²) в среднемноголетнем масштабе, которая была выведена на базе многолетнего мониторинга стока наносов для перигляциальных водосборов Швейцарских Альп (8) [Schlunegger, Hinderer, 2003]. Расчет по этой формуле, как для водосбора Джанкуата, так и для р. Терек, дает погрешности в сторону завышения в 4,8 и 3,2 раза соответственно

$$\frac{G}{R+G} = 5,06 \ln(F) + 52,5. \quad (8)$$

Пульсирующий режим транспорта наносов в «ловушке наносов». Выше было показано, что в пределах участка расширения днища долины, являющегося ловушкой наносов, доминируют процессы аккумуляции транспортируемого потоком материала. Для горных водотоков характерно чередование волн эрозии и аккумуляции, а сам процесс переотложения наносов носит пульсирующий характер [Cavalli et al., 2013].

Данное положение может быть хорошо проиллюстрировано динамикой баланса влекомых наносов на исследованном участке расширения днища долины между створами А и Б. Для 2016 года баланс стока влекомых наносов всегда положительный и находится в диапазоне от 0,042 до 0,478 кг/с, возрастая по мере роста расходов воды. В 2023 г. баланс стока влекомых наносов был практически в 10 раз меньше по сравнению с 2016 г., и падал вплоть до отрицательных значений, когда расход влекомых наносов на нижнем посту превышал значения на верхнем. В свою очередь расходы воды в 2023 г. значительно меньше, их максимальные значения ниже в 2 раза по сравнению с 2016 г.

В 2023 г. 11–13 августа на водотоке наблюдались максимальные расходы воды до 1,6 м³/с, что связано с выпадением 20 мм осадков и интенсивным таянием ледника за счет высоких температур воздуха. В этот период в целом преобладала эрозия сток влекомых наносов на нижнем посту выше, чем на верхнем.

После данного паводка следует плавное снижение расходов воды вплоть до 12–17 августа 2023 г. В данный период наблюдаются переменные пульсации эрозии/аккумуляции наносов, баланс наносов близок к нулевым значениям. К 17.08.2023 среднесуточные расходы воды приблизились к 0,6–1,2 м³/с. Баланс влекомых наносов стал устойчиво положительным, процессы аккумуляции превышали темпы размыва русла.

Для 23 августа было получено две пары наблюдений: утром (9:50) и вечером (17:55), примечательно, что и в течение дня происходило изменение баланса влекомых наносов. В утренние часы при низких расходах воды в 0,82 м³/с баланс наносов был близок к 0 и составлял 0,01 кг/с, с увеличением расходов воды во второй половине дня до 1,08 м³/с происходило увеличение положительного баланса до 0,03 кг/с – наблюдался рост темпов аккумуляции.

Вклад горизонтальных деформаций русел в баланс влекомых наносов на участке расширения днища долины. Агрегация значений среднего диаметра наносов по участкам расширения днища долины в 50 м (см. рис. 2В) отчетливо показывает его уменьшение вниз по течению. Значение среднего диаметра в нижней точке определены в диапазоне от 16,0 до 18,7 мм, в верхней точке – 24,2–26,9 мм. Средний диаметр отложений снижается в 1,6 раза. Данное распределение свидетельствует о сортировке наносов внутри участка, которая возникает из-за снижения транспортирующей способности потока, что характеризует относительно стабильные гидрологические условия.

В соседней долине, руч. Адыл-Су, данная сортировка полностью отсутствует по всему течению

реки, русловые отложения в долине имеют фракционный состав от илистого песка до крупных глыб, диаметром первых метров. Это связано с тем, что в 2017 г. из-за прорыва ледникового озера Башкара по долине прошел сель [Черноморец и др., 2018].

По плану восстановленного положения русла с 1983 по 2023 г. (см. рис. 3) видно, что уже после 2012 г. основной рукав руч. Джанкуат начинает смещаться к правому борту долины, но данный процесс происходил несколько выше по течению. Выброс материала, произошедший вследствие прорыва боковой морены ледника Джанкуат, в июле 2015 г. не привел к радикальным переменам в русловом режиме, и тенденция смещения русла от левого берега долины к Башкаринской морене продолжилась. Можно говорить о том, что в целом для данного участка днища долины характерно активное меандрирование основного рукава от одного борта к другому за счет постепенного заполнения русла наносами, что совместно с горизонтальными деформациями, приводит к его миграции. При прорыве боковой морены в 2015 г. основную долю материала, поступившего в руч. Джанкуат, составляли взвешенные наносы, об этом свидетельствует отсутствие значимой перестройки русла в 2015 г., которая бы происходила при значительном расходе влекомых наносов. Основная часть крупнообломочного материала переотложилась в образовавшемся при прорыве конусе выноса, поэтому можно говорить о том, что современная перестройка положения русла после 2016 г. в большей степени связана с перерывом материала конуса выноса, появившегося после прорыва, чем с событием прорыва боковой морены.

Объем русловых деформаций для руч. Джанкуат в пределах участка расширения днища долины составляет порядка $1,26 \cdot 10^6$ кг/год, и учитывая, что объем влекомого стока составляет в среднем $1,3 \cdot 10^6$ кг/год, а аккумуляция на данном участке $0,72 \cdot 10^6$ кг/год, то можно говорить о том, что продукты размыва русла на данном участке выступает ключевым источником переотложения наносов.

Диаметр влекомых наносов и русловых отложений. Анализ гранулометрического состава русловых отложений позволяет оценить сток наносов за исторический период, а его сравнение с диаметром влекомых частиц оценить вклад влекомых наносов в формировании отложений на участке расширения днища долины для периодов сопоставимой водности.

На рис. 5 представлено совместное распределение диаметров проб влекомых наносов и русловых отложений, осредненное по всем пробам. Пробы влекомых наносов имеют одномодальное распределение с пиком в 0,75 мм, хотя в отдельных пробах встречались частицы диаметром до 20 мм и

более. Русловые отложения характеризуются мультимодальной функцией распределения диаметра. Первый пик связан с крупнейшими обломками, валунами, которые имеют диаметр более 120 мм, второй пик диаметра (17–70 мм) менее выражен и связан с заполнением пространства между крупными обломками гравием. Третий пик (0,175 мм) приурочен к мелкозему, пылеватой фракции, заполняющей поры между частицами гравия. Среди 8 исследованных площадок встречаются такие, где доминирующую роль играет именно пылеватая фракция, а галька, гравий и валуны имеют единичное распространение.

Можно утверждать, что на пойме руч. Джанкуат массовое отложение наносов в основном происходит во время экстремальных паводков малой обеспеченности. Объем влекомых наносов при данных отметках расходов воды кратно возрастает, что также подтверждается значительно большим диаметром русловых отложений, относительно проб, полученных при измерении влекомых наносов. Так как медианный диаметр отложений в пределах данного участка днища составляет 22 мм, что превышает средний диаметр влекомых наносов при его измерениях, который составляет 2,6 мм, почти в 9 раз. Максимальный расход воды, при котором был измерен расход влекомых наносов составил $3,08 \text{ м}^3/\text{с}$, значение расхода влекомых наносов $0,53 \text{ кг/с}$. В то же самое время максимальные суточные расходы воды в 2015 г. при прорыве прорана превышали отметки в $6 \text{ м}^3/\text{с}$ [Kedich et al., 2023]. По данным измерений Г.Н. Голубева в 1973 г. обильное выпадение ливневых осадков привело к формированию паводка с расходами воды более $10 \text{ м}^3/\text{с}$, причем по утверждению автора данная оценка была занижена из-за повреждения вертушки влекомыми по дну валунами [Голубев, 1976]. В 1975 г. по экспертной оценке того же автора на ручье Джанкуат проходил паводок в $30 \text{ м}^3/\text{с}$, чья обеспеченность была оценена в 2% [Ледник..., 1978]. Независимым подтверждением максимальных объемов аккумуляции наносов на исследуемом участке днища долины в эти годы являются почти на порядок более высокие темпы аккумуляции в период с 1963 по 1986 г., по сравнению с периодом 1986–2017 гг., выявленные на основе радиоцезиевого метода (см. рис. 8).

Темпы аккумуляции наносов на участке расширения днища долины за последние 120 лет. Исходя из предположения о том, что в 1893 ± 20 г. граница ледника была на верхней границе участка чуть ниже по течению от поста А (см. рис. 1), о чем свидетельствует датировка конечной морены [Алейникова, Петрушина, 2011; Verhaegen et al., 2020], можно говорить о том, что накопление наносов руслового генезиса происходит в пределах ис-

следуемого участка на протяжении порядка 120 лет. При темпах аккумуляции, полученных по балансу влекомых наносов, равных 4,8 мм/год, за данный период предположительно должно было отложиться 57,6 см осадков.

Косвенно в качестве оценки слоя аккумуляции может служить глубина вреза русел в пределах участка расширения днища долины. По данным измерений глубина вреза русел, за исключением

отдельных выбросов, достигает значений в 55 см, что практически совпадает с оценками по балансу наносов. Это отчасти подтверждает достоверность полученных оценок слоя суммарной аккумуляции за 120-летний период.

По радиоцезиевым датировкам скорость аккумуляции за весь период с 1963 по 2017 г. составила $5,6 \pm 1,0$ мм/год, что совпадает оценками аккумуляции по балансовому методу.

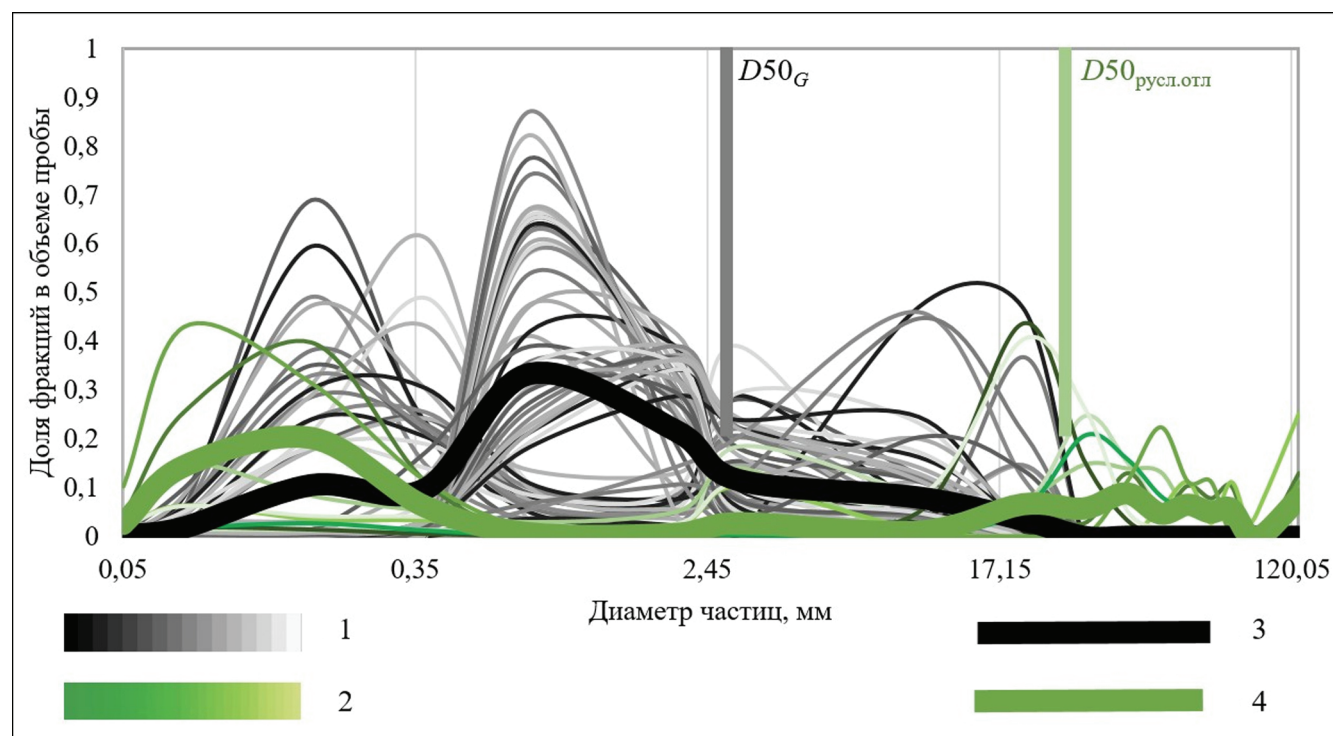


Рис. 5. Диаметр проб влекомых наносов и русловых отложений по данным полевых исследований:

1 – пробы влекомых наносов, 2016, 2017, 2023 гг.; 2 – пробы русловых отложений; 3 – средневзвешенное значение по всем пробам влекомых наносов; 4 – среднее значение по всем пробам влекомых наносов русловых отложений

Fig. 5. Diameter of bed load samples and floodplain sediments according to field data:

1 – bed load samples, 2016, 2017, 2023; 2 – samples of riverbed sediments; 3 – weighted average value for bedload samples; 4 – average value for all floodplain sediments samples

ВЫВОДЫ

На основе данных мониторинга стока взвешенных и влекомых наносов в руч. Джанкуат в период с 2015 по 2023 г. и установленных эмпирических связей с расходом воды было получено значение суммарного стока наносов (влекомый + взвешенный) в $10,1 \cdot 10^6$ кг/год. Расчеты показали, что на долю влекомого стока наносов приходится в среднем 13%. В составе влекомого стока доминируют фракции от среднего песка до среднего гравия.

Установлено, что при расходах воды средней и высокой обеспеченности порядка 60% стока влекомых наносов, формирующегося на участке от края ледника до гидрологического створа А, переоткладывается в пределах участка расширения днища

долины, расположенного ниже по течению от створа А. Среднемноголетнее значение аккумуляции составляет $0,71 \cdot 10^6$ кг/год, в то же время данная величина имеет ярко выраженный пульсирующий характер, обусловленным сменой этапов эрозии и аккумуляции в результате изменения водности ручья. В целом на участке расширения днища долины наблюдается направленное осадконакопление со скоростью 4,8 мм/год. Эти оценки, полученные на основе радиоцезиевых датировок (5,6 мм/год), были близки к темпам аккумуляции на данном участке.

По результатам съемки БПЛА участок расширения днища долины руч. Джанкуат имеет площадь 70×170 м², 66% данной площади занято незадернованными русловыми отложениями, наиболее ча-

сто встречается галька и гравий диаметром 22 мм. Было показано, что медианный диаметр русловых отложений в 10 раз превышает диаметр проб влекомых наносов, что может говорить о том, что основную роль в осадконакоплении на пойме играют расходы воды низкой обеспеченности. Кроме того, было выявлено, что на данном участке просматриваются следы сортировки наносов, медианный диа-

метр отложений от его верхней границы к нижней снижается в 1,6 раза. Пояс русловых деформаций в самом широком месте за последние 42 года составляет 150 м. На текущий момент наиболее интенсивные русловые переформирования происходят в центральной части участка и составляют 4,2 м/год. Было выявлено, что объем русловой эрозии в период с 2016 по 2023 г. составляет 1260 т/год.

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарность коллективу сотрудников и студентов-практикантов ледникового отряда Эльбрусской учебно-научной базы географического факультета МГУ за помощь в проведении полевых работ. Отдельно хотелось бы поблагодарить И.В. Железнову, Ю.А. Зубихину, М.Е. Зубову, И.А. Сучкову, С.В. Харченко, А.Н. Губанова за помощь в измерении стока влекомых наносов и расходов воды, О.И. Турчинскую, В.А. Ефимова, В.О. Базилову, Е.Д. Панченко, М.А. Терешину за предоставленные фотографии долинного ландшафта, М.М. Иванова за помощь в обработке проб, Е.Д. Корнилову и Е.П. Рец за консультации и предоставление гидрометеорологических данных, а также начальника ледникового отряда В.В. Поповнину за оказанную поддержку и помощь в исследовании. Настоящая работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-614) и в рамках Государственной программы № 121051100166-4 НИЛ ЭПиРП им. Н.И. Маккавеева МГУ им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алейникова А.М., Петрушина М.Н. Структура и динамика приледниковых ландшафтов Приэльбрусья // Лед и Снег. 2011. Т. 2. № 114. С. 127–134.
- Голубев Г.Н. Гидрология ледников. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 248 с.
- Дюргеров М.Б., Фрейдлин В.С., Чернова Л.П. Сток взвешенных наносов в бассейне ледника Джанкуат летом 1970 года // Материалы гляциологических исследований. 1972. Т. 19. С. 253–254.
- Иванов М.М., Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Шамигурина Е.Н. Оценка накопления сорбированного изотопа ^{137}Cs в верхних звеньях флювиальной сети в зоне Черномыльского загрязнения // География и природные ресурсы. 2016. № 4. DOI: 10.21782/gipr0206-1619-2016-4(156-163).
- Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 271 с.
- Кузьменкова Н.В., Голосов В.Н., Грабенко Е.А. и др. Скорости осадконакопления в горных озерах Кавказа как индикаторы темпов денудации на их водосборах // Известия Российской Академии наук. Серия Географическая. 2023. Т. 87. № 1. С. 42–59. DOI: 10.31857/S2587556623010107.
- Ледник Джанкуат: Центр. Кавказ / под ред. И.Я. Боярского. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 184 с.
- Мозжерин В.В., Шарифуллин А.Г. Оценка современного денудационного снижения гор по данным о стоке взвешенных наносов рек (на примере Тянь-Шаня, Памиро-Алая, Кавказа и Альп), Геоморфология, 2014. № 1. С. 15–23. DOI: 10.15356/0435-4281-2014-1-15-23.
- Северный Кавказ // Ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1973. Т. 8. 124 с.
- Харченко С.В., Голосов В.Н., Цыпленков А.С. и др. Темпы современной денудации малого водосбора в среднегорном поясе Большого Кавказа (на примере водосбора Гитче-Гижигит) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. Т. 78. № 3. С. 38–51. DOI: 10.55959/msu0579-9414.5.78.3.4.
- Цыпленков А.С. Идентификация долевого вклада различных источников в сток наносов малых горных рек зоны современного оледенения // Сборник материалов ежегодного научного семинара «Маккавеевские чтения – 2019». М.: Географический факультет МГУ, 2020. С. 94–105.
- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А. и др. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия). 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 2. С. 70–80.
- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.В. и др. Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-Су (Кавказ) // Криосфера Земли. 2007. Т. 11. № 1. С. 72–84.
- Шарифуллин А.Г. Современная денудация в горах Кавказа и Средней Азии: территориальные особенности и факторы, их определяющие. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2015. 22 с.
- Bollati I.M., Cavalli M. Unraveling the relationship between geomorphodiversity and sediment connectivity in a small alpine catchment, *Transactions in GIS*, 2021, vol. 25, no. 5, DOI: 10.1111/tgis.12793.
- Cavalli M., Trevisani S., Comiti F. et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments // *Geomorphology*. 2013, vol. 188, p. 31–41, DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.05.007.
- Engel M., Coviello V., Savi S. et al. Meltwater-driven sediment transport dynamics in two contrasting alpine proglacial streams, *Journal of Hydrology*, 2024, vol. 635, p. 131171, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131171.
- Geomorphology of Proglacial Systems: Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciated Alpine Landscapes* (Geography of the Physical Environment), T. Heckmann, D. Morche (eds.), Cham, Springer International Publishing, 2019, DOI: 10.1007/978-3-319-94184-4.
- Gray J.R., Laronne J.B., Marr J.D.G. Bedload-surrogate monitoring technologies, US Geological Survey Scientific Investigations Report, 2010, T. 5091.

- Hallet B., Hunter L., Bogen J. Rates of erosion and sediment evacuation by glaciers: A review of field data and their implications, *Global and Planetary Change*, 1996, vol. 12, no. 1–4, DOI: 10.1016/0921-8181(95)00021-6.
- Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides, 2003, DOI: 10.1007/0-306-48054-9.
- Helley E.J., Smith W. *Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler*, US Department of the Interior, Geological Survey, Water Resources Division, 1971.
- Hinderer M. From gullies to mountain belts: A review of sediment budgets at various scales, *Sedimentary Geology*, 2012, vol. 280, p. 21–59, DOI: 10.1016/j.sedg-eo.2012.03.009.
- Hinderer M., Kastowski M., Kamelger A. et al. River loads and modern denudation of the Alps – A review, *Earth-Science Reviews*, 2013, vol. 118, DOI: 10.1016/j.earsci-rev.2013.01.001.
- Kedich A., Kharchenko S., Tsyplenkov A. et al. Lateral moraine failure in the valley of the Djankuat Catchment (Central Caucasus) and subsequent morphodynamics, *Geomorphology*, 2023, vol. 441, DOI: 10.1016/j.geomorph.2023.108896.
- Kharchenko S., Tsyplenkov A., Petrakov D. et al. Causes and consequences of the streambed restructuring of the Koiavgan Creek (North Caucasus, Russia), *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 163, DOI: 10.1051/e3s-conf/202016302003.
- Koppes M.N., Montgomery D.R. The relative efficacy of fluvial and glacial erosion over modern to orogenic time-scales, *Nature Geoscience*, 2009, vol. 2, no. 9, DOI: 10.1038/ngeo616.
- Otto J.C., Schrott L., Jaboyedoff M. et al. Quantifying sediment storage in a high alpine valley (Turtmanntal, Switzerland), *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, vol. 34, no. 13, DOI: 10.1002/esp.1856.
- Popovnin V., Gubanov A., Lisak V. et al. Recent Mass Balance Anomalies on the Djankuat Glacier, Northern Caucasus, *Atmosphere*, 2024, vol. 15, no. 1, p. 107, DOI: 10.3390/atmos15010107.
- Porto P., Callegari G. Using ^7Be measurements to explore the performance of the SEDD model to predict sediment yield at event scale, *Catena*, 2021, vol. 196, DOI: 10.1016/j.catena.2020.104904.
- Rets E.P., Popovnin V.V., Toropov P.A. et al. Djankuat glacier station in the North Caucasus, Russia: A database of glaciological, hydrological, and meteorological observations and stable isotope sampling results during 2007–2017, *Earth System Science Data*, 2019, vol. 11, no. 3, DOI: 10.5194/essd-11-1463-2019.
- Schlunegger F., Hinderer M. Pleistocene/Holocene climate change, re-establishment of fluvial drainage network and increase in relief in the Swiss Alps, *Terra Nova*, 2003, vol. 15, no. 2, DOI: 10.1046/j.1365-3121.2003.00469.x.
- Syvitski J.P.M., Milliman J.D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean, *Journal of Geology*, 2007, vol. 115, no. 1, DOI: 10.1086/509246.
- 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, no. 2, DOI: 10.5194/tc-16-489-2022.
- 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, DOI: 10.1016/j.catena.2021.105285.
- Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Golosov V. Contemporary suspended sediment yield of Caucasus mountains, *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2019, vol. 381, DOI: 10.5194/piahs-381-87-2019.
- 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, *Journal of Soils and Sediments*, 2020, vol. 20, no. 8, DOI: 10.1007/s11368-020-02633-z.
- Verhaegen Y., Huybrechts P., Rybak O. et al. Modelling the evolution of Djankuat Glacier, North Caucasus, from 1752 until 2100CE, *Cryosphere*, 2020, vol. 14, no. 11, DOI: 10.5194/tc-14-4039-2020.
- Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I. et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century, *Journal of Glaciology*, 2015, vol. 61, no. 228, DOI: 10.3189/2015JoG15J017.

Поступила в редакцию 06.07.2024

После доработки 08.09.2024

Принята к публикации 15.10.2024

THE EFFECT OF TOTAL SEDIMENT RUNOFF ON EROSION AND ACCUMULATION PROCESSES IN THE VALLEY OF THE DJANKUAT STREAM, GREATER CAUCASUS

V.A. Ivanov¹, V.N. Golosov², A.S. Tsyplenkov³, A.V. Konoplev⁴

^{1,4} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Geochemistry of Natural Waters

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

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
The Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes

³ Landcare Research Ltd., 4410 Palmerston North, New Zealand

⁴ Institute of Environmental Radioactivity, Fukushima University, Japan

¹ Junior Scientific Researcher; Post-Graduate Student; e-mail: viktoro.1998@yandex.ru

² Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: golosov@gmail.com

³ Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: atsyplenkov@gmail.com

⁴ Professor; D.Sc. in Biology; e-mail: alexekonoplev@gmail.com

The article presents the results of the study of the suspended and bed sediment runoff for the modern period. In addition the features of sediment deposition within a valley bottom section of the Djankuat stream catchment ($F = 9,1 \text{ km}^2$, $Q_{\text{mean}} = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$) with predominance of accumulation are discussed. Field research methods included direct measurements of bed load using the Helly-Smith sampler, determination of the average diameter of bed load and floodplain sediments, channel deformations and accumulation rates on the floodplain within the broader section of the valley floor, including the radiocesium dating method. It has been established that the total sediment runoff of the Djankuat Stream is $10,1 \cdot 10^6 \text{ kg/year}$, 13% of which is the bed load. According to the bed load sediment budget observations in 2016 and 2023, as well as the radiocesium dating of floodplain sediments, the accumulation rate on the floodplain within the broader section of the valley floor is $4,8\text{--}5,6 \pm 1,0 \text{ mm/year}$ over the total period since its origination (120 years). During 2016–2023 the volume of annual channel erosion within the same section is 1260 tons/year. The nine-fold difference between the average diameter of the bed load sediments and the median diameter of the floodplain sediments within the broader section of the valley floor indicates that the main deposition events are related to extreme floods with less frequent water discharges.

Keywords: bed load, ^{137}Cs , sediment budget, periglacial catchments, small rivers catchments

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the staff and students at the Djankuat glacial station of the MSU Faculty of Geography for their assistance during fieldwork. Particular thanks are due to I.V. Zheleznova, Yu.A. Zubikhina, M.E. Zubova, I.A. Suchkova, S.V. Kharchenko and A.S. Gubanov for their assistance in measuring the bedload and water discharge, to O.I. Turchinskaya, V.A. Efimov, V.O. Bazilova, E.D. Panchenko and M.A. Tereshina for the filed photo of the floodplain, to M.M. Ivanov for his assistance in the processing of samples, to E.D. Kornilova and E.P. Retz for consulting and providing hydrometeorological data, and to the Head of the glacial station V.V. Popovnin, for his support and assistance in the study. Analytical part of the study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under the Agreement No 075-15-2024-614 under the framework of the state task No 121051100166-4 of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes of the Lomonosov Moscow State University.

REFERENCES

- Alejnikova A.M., Petrushina M.N. Struktura i dinamika prilednikovyh landshaftov Priel'brus'ya [The structure and dynamics of periglacial landscapes in Prielbrusie], *Lyod i Sneg*, 2011, vol. 2, no 114, p. 127–134. (In Russian)
- Bollati I.M., Cavalli M. Unraveling the relationship between geomorphodiversity and sediment connectivity in a small alpine catchment, *Transactions in GIS*, 2021, vol. 25, no. 5, DOI: 10.1111/tgis.12793.
- Cavalli M., Trevisani S., Comiti F. et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments, *Geomorphology*, 2013, vol. 188, p. 31–41, DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.05.007.
- Chernomorec S.S., Petrakov D.A., Alejnikov A.A. et al. The outburst of Bashkara glacier lake (Central Caucasus, Russia) on September 1, 2017, *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. 22, no. 2, p. 61–70.
- Chernomorec S.S., Petrakov D.A., Krylenko I.V. et al. Dinamika lednikovo-ozernogo kompleksa Bashkara i ot-senka selevoj opasnosti v doline reki Adyl-Su (Kavkaz) [Changes of the Bashkara glacier lake system and assessment of debris flow hazard in the Adyl-Su River valley], *Kriosfera Zemli*, 2007, vol. 11, no. 1, p. 72–84. (In Russian)
- Cypelenkov A.S. Identifikaciya dolevogo vклада razlichnyh istochnikov v stok nano-sov malyh gornyh rek zony sovremennogo oledeneniya [Identification of the contribution of different sources into the sediment discharge for the small mountain rivers within the present-day glaciations zone], *Makkaveevskie chteniya – 2019* [Makkaveev Scientific Conference – 2019], Sbornik materialov ezhegodnogo nauchnogo seminara. Moscow, Geograficheskij fakul'tet MGU, 2020, p. 94–105. (In Russian)

- Dyurgerov M.B., Frejdlin V.S., Chernova L.P. [Suspended matter runoff in the Djankuat Glacier basin in summer 1970], *Materialy glaciologicheskikh issledovanij* [Materials of glaciological studies], 1972, vol. 19, p. 253–254. (In Russian)
- Engel M., Coviello V., Savi S. et al. Meltwater-driven sediment transport dynamics in two contrasting alpine proglacial streams, *Journal of Hydrology*, 2024, vol. 635, p. 131171.
- Geomorphology of Proglacial Systems: Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciated Alpine Landscapes* (Geography of the Physical Environment), T. Heckmann, D. Morche (eds.), Cham, Springer International Publ., 2019, DOI: 10.1007/978-3-319-94184-4.
- Golubev G.N. *Gidrologiya lednikov* [Hydrology of glaciers], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976, 24 p. (In Russian)
- Gray J.R., Laronne J.B., Marr J.D.G. *Bedload-surrogate monitoring technologies*, US Geological Survey Scientific Investigations Report, 2010, vol. 5091.
- Hallet B., Hunter L., Bogen J. Rates of erosion and sediment evacuation by glaciers: A re-view of field data and their implications, *Global and Planetary Change*, 1996, vol. 12, no. 1–4.
- Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*, 2003, DOI: 10.1007/0-306-48054-9.
- Harchenko S.V., Golosov V.N., Cyplenkov A.S. et al. Tempy sovremennoj denudacii malogo vodosbora v srednegornom poyase Bol'shogo Kavkaza (na primere vodosbora Gitche-Gizhgit) [Rates of modern denudation of a small catchment in the middle mountain belt of the Greater Caucasus (case study of the Gitche-Gizhgit catchment)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2023, vol. 78, no. 3, p. 38–51. (In Russian)
- Helley E.J., Smith W. *Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler*, US Department of the Interior, Geological Survey, Water Resources Division, 1971.
- Hinderer M. From gullies to mountain belts: A review of sediment budgets at various scales, *Sedimentary Geology*, 2012, vol. 280, p. 21–59, DOI: 10.1016/j.sedg-eo.2012.03.009.
- Hinderer M., Kastowski M., Kamelger A. et al. River loads and modern denudation of the Alps – A review, *Earth-Science Reviews*, 2013, vol. 118, DOI: 10.1016/j.earsci-rev.2013.01.001.
- Ivanov M.M., Ivanova N.N., Golosov V.N., Shamshurina E.N. Assessing the accumulation of sorbed isotope ¹³⁷CS within the upper components of the fluvial network in the zone of Chernobyl contamination, *Geography and Natural Resources*, 2016, vol. 37, no. 4, p. 355–361.
- Karashev A.V. *Teoriya i metody rascheta rechnykh nanosov* [Theory and methods of river sediments calculation], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1977, 271 p. (In Russian)
- Kedich A., Kharchenko S., Tsyplenkov A. et al. Lateral moraine failure in the valley of the Djankuat Catchment (Central Caucasus) and subsequent morphodynamics, *Geomorphology*, 2023, vol. 441, DOI: 10.1016/j.geomorph.2023.108896.
- Kharchenko S., Tsyplenkov A., Petrakov D. et al. Causes and consequences of the streambed restructuring of the Koiavgan Creek (North Caucasus, Russia), *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 163, DOI: 10.1051/e3s-conf/202016302003.
- Koppes M.N., Montgomery D.R. The relative efficacy of fluvial and glacial erosion over modern to orogenic timescales, *Nature Geoscience*, 2009, vol. 2, no. 9, DOI: 10.1038/ngeo616.
- Kuz'menkova N.V., Golosov V.N., Grabenko E.A. et al. Skorosti osadkonakopleniya v gornyh ozerah Kavkaza kak indikatory tempov denudacii na ih vodosborah [Sedimentation rates evaluation in Caucasus Mountain lakes as indicators of their catchments denudation], *Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk, Seriya Geograficheskaya*, 2023, vol. 87, no. 1, p. 42–59, DOI: 10.31857/S2587556623010107. (In Russian)
- Lednik Dzhankuat: Centr. Kavkaz* [The Djankuat Glacier: Central Caucasus], I.Ya. Boyarsky (ed.), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978, 184 p. (In Russian)
- Mozzherin V.V., Sharifullin A.G. Ocenka sovremennoego denudacionnogo snizheniya gor po dannym o stoke vzveshennykh nanosov rek (na primere Tyan'-Shanya, Pamiro-Alaya, Kavkaza i Al'p) [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)], *Geomorfologiya*, 2014, no. 1, p. 15–23, DOI: 10.15356/0435-4281-2014-1-15-23. (In Russian)
- Otto J.C., Schrott L., Jaboyedoff M. et al. Quantifying sediment storage in a high alpine valley (Turtmanntal, Switzerland), *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, vol. 34, no. 13, DOI: 10.1002/esp.1856.
- Popovnin V., Gubanov A., Lisak V. et al. Recent Mass Balance Anomalies on the Djankuat Glacier, Northern Caucasus, *Atmosphere*, 2024, vol. 15, no. 1, p. 107, DOI: 10.3390/atmos15010107.
- Porto P., Callegari G. Using ⁷Be measurements to explore the performance of the SEDD model to predict sediment yield at event scale, *Catena*, 2021, vol. 196, DOI: 10.1016/j.catena.2020.104904.
- Severnij Kavkaz, Resursy poverhnostnykh vod SSSR* [Northern Caucasus, Resources of surface waters in the USSR], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973, vol. 8, 124 p. (In Russian)
- Rets E., Popovnin V.V., Toropov P.A. et al. Djankuat glacier station in the North Caucasus, Russia: A database of glaciological, hydrological, and meteorological observations and stable iso-tope sampling results during 2007–2017, *Earth System Science Data*, 2019, vol. 11, no. 3, DOI: 10.5194/essd-11-1463-2019.
- Schlunegger F., Hinderer M. Pleistocene/Holocene climate change, re-establishment of fluvial drainage network and increase in relief in the Swiss Alps, *Terra Nova*, 2003, vol. 15, no. 2, DOI: 10.1046/j.1365-3121.2003.00469.x.
- Sharifullin A.G. *Sovremennaya denudaciya v gorah Kavkaza i Srednej Azii: territorial'nye osobennosti i faktory, ih opredelyayushchie* [Current denudation in the mountains of the Caucasus and the Middle Asia: territorial features and the governing factors], Kazan, Kazanskij (Privolzhskij) federal'nyj universitet, 2015, 22 p. (In Russian)
- Syvitski J.P.M., Milliman J.D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean, *Journal of Geology*, 2007, vol. 115, no. 1, DOI: 10.1086/509246.
- 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, no. 2, DOI: 10.5194/tc-16-489-2022.

- 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, DOI: 10.1016/j.catena.2021.105285.
- Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Golosov V. Contemporary suspended sediment yield of Caucasus mountains, *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2019, vol. 381, DOI: 10.5194/piahs-381-87-2019.
- 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, *Journal of Soils and Sediments*, 2020, vol. 20, no. 8, DOI: 10.1007/s11368-020-02633-z.
- Verhaegen Y., Huybrechts P., Rybak O. et al. Modelling the evolution of Djankuat Glacier, North Caucasus, from 1752 until 2100CE, *Cryosphere*, 2020, vol. 14, no. 11, DOI: 10.5194/tc-14-4039-2020.
- Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I. et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century, *Journal of Glaciology*, 2015, vol. 61, no. 228, DOI: 10.3189/2015JoG15J017.

Received 06.07.2024

Revised 08.09.2024

Accepted 15.10.2024