

ТРАНСФОРМАЦИЯ РУСЛА Р. БАКСАН ЗА 40-ЛЕТНИЙ ПЕРИОД НА ФОНЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

© 2026 г. В. С. Посаженникова^{1, *}, В. Н. Голосов^{1, 2}, С. В. Харченко^{1, 2}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

*E-mail: vitaposazhennikova@gmail.com

Поступила в редакцию 14.01.2026

После доработки 03.03.2026

Принята к публикации 20.03.2026

Аннотация. Река Баксан является одним из типичных водотоков Северного Кавказа, бассейны которых занимают обширные участки среднегорно-высокогорного пояса. Для притоков и верхнего течения таких рек характерно периодическое формирование селевых паводков различной мощности, которые поставляют значительные объемы рыхлообломочного материала на дно долин и способствуют формированию мощных паводков. В результате происходят значительные трансформации участков русел транзитных рек. Паводок, сформированный в днище долины р. Адыл-Су вследствие прорыва ледникового оз. Башкара 1 сентября 2017 г., оказал существенное влияние на русловой рельеф принимающей р. Баксан. В исследовании приводится количественная оценка изменений морфометрических параметров русла р. Баксан на участке его среднего течения (выше г. Тырныауз) в период с 1984 г. (сразу после прохождения предыдущего мощного паводка) и спустя 6 лет после паводка 2017 г. Цель исследования — выявление закономерностей трансформации русла р. Баксан при прохождении экстремальных паводков и оценка его способности к восстановлению на фоне климатических изменений последних 40 лет. Анализ проводился на основе дешифрирования разновременных космических снимков и сегментации речной сети на относительно однородные участки с дальнейшим присвоением каждому сегменту набора морфометрических параметров русла. Факторы, влияющие на реакцию русла р. Баксан, были определены с помощью ранговой корреляции Спирмена. Основной реакцией на экстремальный паводок было расширение русла в среднем в 1.6 раз и усложнение его морфодинамических типов. За следующие 6 лет без экстремальных паводков увеличение ширины наблюдалось на 28% протяженности русла в среднем в 1.3 раза. Нивелирование последствий экстремального паводка, выраженное в сужении русла в среднем на 20–25% и обратной трансформации русел к относительно прямолинейному морфодинамическому типу, было характерно для трети от общей протяженности исследуемого участка. Особенно чувствительными оказались более узкие до селевого паводка участки русла, в наибольшей степени стесненные бортами долины. В представленных временных масштабах исследования данные участки русла испытали необратимую трансформацию, перейдя в новое состояние динамического равновесия (“метастабильная устойчивость”). Расположенные в сужениях дна долины участки русла с исходно большей шириной не только успешно пропустили экстремальный поток без существенных перестроек, но и характеризовались выраженной тенденцией к возвращению своих исходных морфометрических параметров.

Ключевые слова: селевой паводок; русловые процессы; морфодинамика русел; устойчивость геосистем; устойчивость русел; Кавказ

Финансирование. Статья подготовлена при финансовой поддержке РНФ по проекту № 25-17-00143. Часть космоснимков приобретена и отдешифрирована при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, реализуемого в рамках Соглашения № 075-15-2025-008 от 27.02.2025 г.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Благодарности. Авторы выражают благодарность А. А. Воеводиной и И. Н. Крыленко за предоставление данных моделирования прорывного паводка Mike 11 1 сентября 2017 г., И. В. Крыленко и В. В. Суркову — за предоставление фотоматериалов.

Ссылка для цитирования: Посаженникова В. С., Голосов В. Н., Харченко С. В. (2026) Трансформация русла р. Баксан за 40-летний период на фоне климатических и гидрологических изменений. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 57. № 3. С. 438–453.
<https://doi.org/10.7868/S2949179726030036>

Дополнительные материалы. Публикуются на сайте журнала “Геоморфология и палеогеография” – <https://geomorphology.igras.ru/jour/article/view/3749>

FOUR DECADES OF BAKSAN RIVER CHANNEL ADJUSTMENT IN THE CONTEXT OF CLIMATIC AND HYDROLOGICAL CHANGE

V. S. Posazhennikova^{a, #}, V. N. Golosov^{a, b} and S. V. Kharchenko^{a, b}

^a*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

^b*Institute of Geography of the RAS, Moscow, Russia*

[#]*E-mail: vitaposazhennikova@gmail.com*

Received January 14, 2026

Revised March 03, 2026

Accepted March 20, 2026

Abstract. River basins draining the mid- and high-mountain belts of the North Caucasus, exemplified by the Baksan River, are prone to periodic debris floods in their headwaters. These events deliver substantial volumes of clastic sediment to main valleys, driving significant channel transformations downstream. The catastrophic flood generated by the September 1, 2017 outburst of Bashkara Glacial Lake in the Adyl-Su valley provided a pivotal opportunity to assess such impacts on the receiving Baksan River. In this study, morphometric changes were quantified along a middle-course reach upstream of Tynyauz. The analysis spans a 40-year period starting from 1984, selected in the immediate aftermath of a preceding major flood, and extends to cover conditions immediately following and six years after the 2017 event. The aim was to elucidate channel dynamics and evaluate system resilience to impulsive disturbances within the context of climatic shifts over the past four decades. Multi-temporal satellite imagery was employed to segment the river network into homogeneous reaches, with a suite of morphometric parameters subsequently derived for each segment. Controlling factors were identified through Spearman’s rank correlation analysis. The immediate geomorphic response to the 2017 flood was characterized by substantial channel widening, averaging a factor of 1.6, and a shift toward more complex planform morphologies. During the subsequent six-year period without extreme floods, divergent trajectories were observed: continued widening (averaging a factor of 1.3) was detected along 27% of the study reach, while recovery through channel narrowing (20–25%) and simplification toward straighter patterns occurred along one-third of its length. Pre-flood channel geometry was found to be a critical control. Narrower, highly confined reaches exhibited the greatest sensitivity and a meta-stable resilience at the studied timescale. In contrast, initially wider reaches located within valley constrictions not only absorbed the impulsive disturbance but were characterized by a positive recovery trajectory, underscoring the fundamental role of antecedent valley morphology in determining long-term channel response and resilience.

Keywords: debris flood; channel widening; channel pattern changes; geomorphic resilience; channel resilience; channel recovery; Caucasus

Funding. This research was funded by the Russian Science Foundation (Grant No. 25–17–00143). The acquisition and interpretation of part of the satellite imagery was funded by the Government of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2025-008).

Conflict of interests. The authors declare that there are no obvious or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Acknowledgments. The authors are grateful to A. A. Voevodina and I. N. Krylenko for sharing the modeling data of the outburst flood on September 1, 2017, conducted with the MIKE11 model. We also thank I. V. Krylenko and V. V. Surkov for providing photographic materials.

For citation: Posazhennikova V. S., Golosov V. N., and Kharchenko S. V. (2026) Four decades of Baksan River channel adjustment in the context of climatic and hydrological change. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 57. No. 3. P. 438–453. (in Russ.).
<https://doi.org/10.7868/S2949179726030036>

Supplementary materials. Additional material is published on the web-site of the journal “Геоморфология и палеогеография” – <https://geomorphology.igras.ru/jour/article/view/3749>

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые в последние десятилетия климатические изменения способствуют увеличению темпов снеготаяния и дегляциации, росту интенсивности и повторяемости ливневых осадков (Groisman et al., 2005; Coumou, Rahmstorf, 2012). Это влияет на мощность и повторяемость таких экстремальных гидрологических событий (ЭГС), как селевые паводки, оказывающие существенное влияние на трансформацию рельефа горных бассейнов, в частности, русел рек. В предыдущих исследованиях (Krapesch et al., 2011; Surian et al., 2016; Ruiz-Villanueva et al., 2023) было показано, что основной реакцией на ЭГС является расширение русел — процесс, способный в густонаселенных горных долинах привести к потере ценных земель, разрушению объектов инфраструктуры, зданий. Несмотря на увеличение повторяемости ЭГС (Куксина и др., 2017) и значимость их последствий, расширение русел не учитывается при управлении природными рисками из-за сложности прогнозирования данного процесса.

Существует целый ряд исследований, в которых продемонстрировано влияние различных факторов на морфологические изменения речных русел вследствие ЭГС. Наиболее статистически значимыми факторами в большинстве работ были определены гидравлические переменные, такие как пропускная способность русла, мощность и удельная мощность потока (Costa, O'Connor, 1995; Magilligan et al., 1998, 2015) и морфометрические показатели (Krapesch et al., 2011; Surian et al., 2016; Ruiz-Villanueva et al., 2023; Scorpio, Comiti, 2024), а именно коэффициент стесненности, рассчитываемый как отношение ширины дна долины к ширине русла, и ширина русла до ЭГС.

Другим важным аспектом исследований стало изучение устойчивости речных систем и ее компонентов — способности поглощать возмущения без необратимого перехода в новое состояние системы (Fuller et al., 2019; Piégay et al., 2020). В геоморфологии устойчивость рассматривается как способность системы к сопротивлению при возмущении и к восстановлению — возвращению системы к исходному или близкому к нему состоянию после возмущения (Hodgson et al., 2015). На отдельных участках речная система может обладать и высокой, и низкой чувствительностью к возмущениям в зависимости от близости тех к геоморфологическому порогу (geomorphic thresholds), превышение которого приводит к качественному изменению системы (Schumm, 1979). Выделяется несколько типов устойчивости русел рек: 1) стабильная, при которой система после возмущения быстро возвращается к исходному состоянию, 2) динамическая,

отличающаяся непрерывной адаптацией к изменениям окружающей среды, и 3) метастабильная, когда вследствие импульсного возмущения происходит превышение геоморфологического порога и система переходит в новое состояние (Fuller et al., 2019). При рассмотрении устойчивости русел особенно важен временной масштаб: изучение длительных временных рядов и численное моделирование показывают, что после ЭГС и аномального поступления наносов реки способны к постепенному врезанию в сформированные аккумулятивные толщи и восстановлению исходной морфологии (Сидорчук, 2025; Phillips, Van Dyke, 2016; Rappale et al., 2017; Scorpio, Comiti, 2024).

В данном исследовании анализируются плановые деформации русла р. Баксан на участке его среднего течения (до г. Тырныауз) за 40-летний период, включая кратко- и долгосрочную реакции русла р. Баксан на экстремальные паводки, вызванные гляцио-ливневыми катастрофическими селями 1983 и 2017 гг. Основными задачами работы являются: 1) количественный анализ морфометрических изменений параметров русла р. Баксан на участке среднего течения от впадения р. Адыл-Су до г. Тырныауза за период с 1984 по 2023 гг.; 2) определение устойчивости русел различного типа к импульсным возмущениям, обусловленным прохождением экстремальных паводков; 3) выявление факторов, предопределяющих траекторию трансформации русла в пределах исследуемого участка.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бассейн р. Баксан располагается близ среднего положения средиземноморской ветви полярного фронта, характеризуется неустойчивой погодой с интенсивными осадками и З, и ЮЗ ветрами со средней скоростью 10 м/с. Суммарное годовое количество осадков составляет 1300 мм с выраженным максимумом в июне—июле. Среднегодовая температура за рассматриваемый период выросла на 1.5°C (рис. 1). В створе Тырныауз бассейн р. Баксан на 16% покрыт ледниками, для которых с конца XIX в. наблюдается отрицательный тренд баланса массы (Tielidze, Wheate, 2020; Todorov et al., 2019). Это предопределило преимущественно ледниковое питание р. Баксан с высоким весенне-летним половодьем, осложненным дождевыми паводками и низкой осенне-зимней меженью (Корнилова и др., 2023). Среднегодовой максимальный расход воды за 1983—2023 гг. составил 110 м³/с, при этом наблюдается тренд снижения максимальных расходов (рис. 1) с короткими периодами повышения водности в 1979—1989 и 2000—2007 гг., практически совпадающими с периодами увеличения

годового количества осадков (Виноградова, Виноградова, 2013).

Долина р. Баксан была заложена по крупному разлому, ориентированному с ЮЗ на СВ, между Главным и Боковым хребтами. Дно долины обладает четковидным строением: на наиболее широком участке, Верхнебаксанской котловине, его ширина достигает 1120 м и сокращается в Эльжуртинской теснине вплоть до 170 м (рис. 2а). Поперечный профиль долины изменяется от V-образного в верхнем течении рассматриваемого участка до корытообразного в четковидных расширениях дна и теснины в нижнем течении. Абсолютная высота исследуемого участка дна изменяется от 1780 до 1270 м при среднем уклоне русла в 2%. Продольный профиль русла ступенчатый, участки с высокими уклонами (6–8%) приурочены к крыльям адаптированных излучин, сформировавшихся на участках дна долины, осложненных конусами выноса. На всем протяжении исследуемого участка большая часть дна занята конусами выноса и шлейфами пролювиального, селевого и обвально-осыпного происхождения, менее 40% площади дна представляют высокая и низкая поймы и русло (рис. 2б, в). Высокая пойма превышает меженный урез русла на 3 м и почти повсеместно освоена сельскохозяйственными угодьями. Высота низкой поймы над меженным урезом не достигает 2–2.5 м, поверхность покрыта густым растительным покровом.

В исследовании анализировался участок русла р. Баксан от устья р. Адыл-Су до створа Тырнауз (рис. 2а). Данный участок испытал сильную деформацию рельефа дна долины и, прежде всего, собственно русла реки, вследствие прохождения двух экстремальных паводков 19 июля 1983 г. и 1 сентября 2017 г., обусловленных формированием мощных гляцио-ливневых селей. Первый паводок сформировался ниже края ледника Западный Тютю в бассейне р. Адыр-Су, правобережном притоке р. Баксан. Формирование селя было обусловлено длительной экстремально жаркой погодой в июле 1983 г. и потерей устойчивости льдонасыщенного моренного массива в результате накопления в нем воды и спровоцировано ливнем, прошедшим в ночь с 18 на 19 июля (Божинский и др., 2008). Суммарный объем выноса в твердой фазе составил 620 тыс. м³, из которых более половины отложилось на конусе выноса р. Куллумкол-Су в районе разрушенного селем альплагеря Джайлык; еще часть селевой массы осталась в пределах дна долины и на конусе выноса р. Адыр-Су. По р. Баксан в результате отложения селевой массы и увеличения расхода воды уже перемещался селевой паводок — поток, насыщенный обломочным материалом, способный на отдельных участках

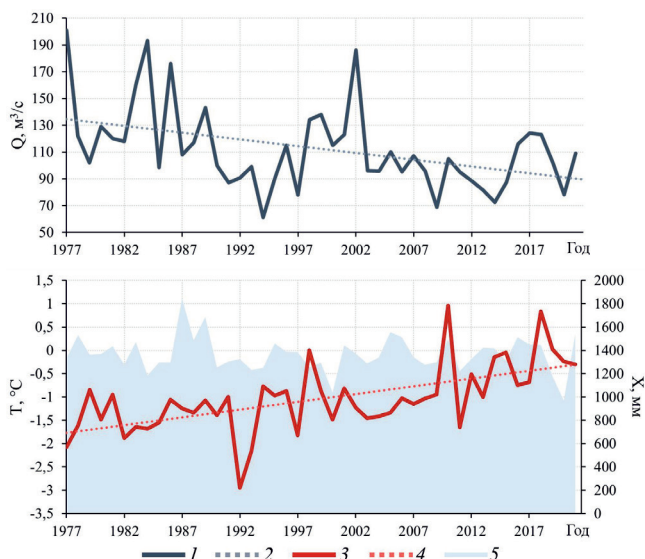


Рис. 1. Климатические и гидрологические изменения с 1977 по 2021 гг. Источник данных о температурах и осадках в с. Терскол — ERA5 (Hersbach et al., 2020): 1 — максимальный расход воды в створе Тырнауз (Q , м³/с); 2 — линейный тренд изменения Q ; 3 — средняя годовая температура (T , °C); 4 — линейный тренд изменения T ; 5 — годовая сумма осадков (X , мм).

Fig. 1. Climatic and hydrological changes from 1977 to 2021. Data source for temperature and precipitation at Terskol: ERA5 (Hersbach et al., 2020): 1 — maximum discharge at the Tyrnauz gauge station (Q , м³/s); 2 — linear trend line of Q ; 3 — mean annual air temperature (T , °C); 4 — linear trend line of T ; 5 — annual precipitation sum (X , mm).

русла к переносу крупных обломков и мобилизации отмостки (Wilford et al., 2004; Church, Jakob, 2020).

Второй паводок был сформирован прорывом ледникового оз. Башкара в верховьях долины р. Адыл-Су. Прорыв был обусловлен деградацией примыкающего к озеру одноименного ледника, уменьшением полезной емкости котловины озера, фильтрацией воды и вымыванием заполнителя боковой морены, а также аномальными осадками, сменившими продолжительный период жаркой сухой погоды и спровоцировавшими резкий подъем уровня воды. Вследствие размыва перемычки объем воды в озере сократился на 800 тыс. м³, что сформировало катастрофический паводок с объемом жидкой фазы около 1.1 млн м³, расходом воды не менее 400 м³/с (Kornilova et al., 2021) и скоростью течения в среднем до 6 м/с (Кидяева и др., 2018; Солодова и др., 2024). Объем твердой фазы селя оценивался в 350–500 тыс. м³, большая часть которых отложилась в дне долины и на конусе

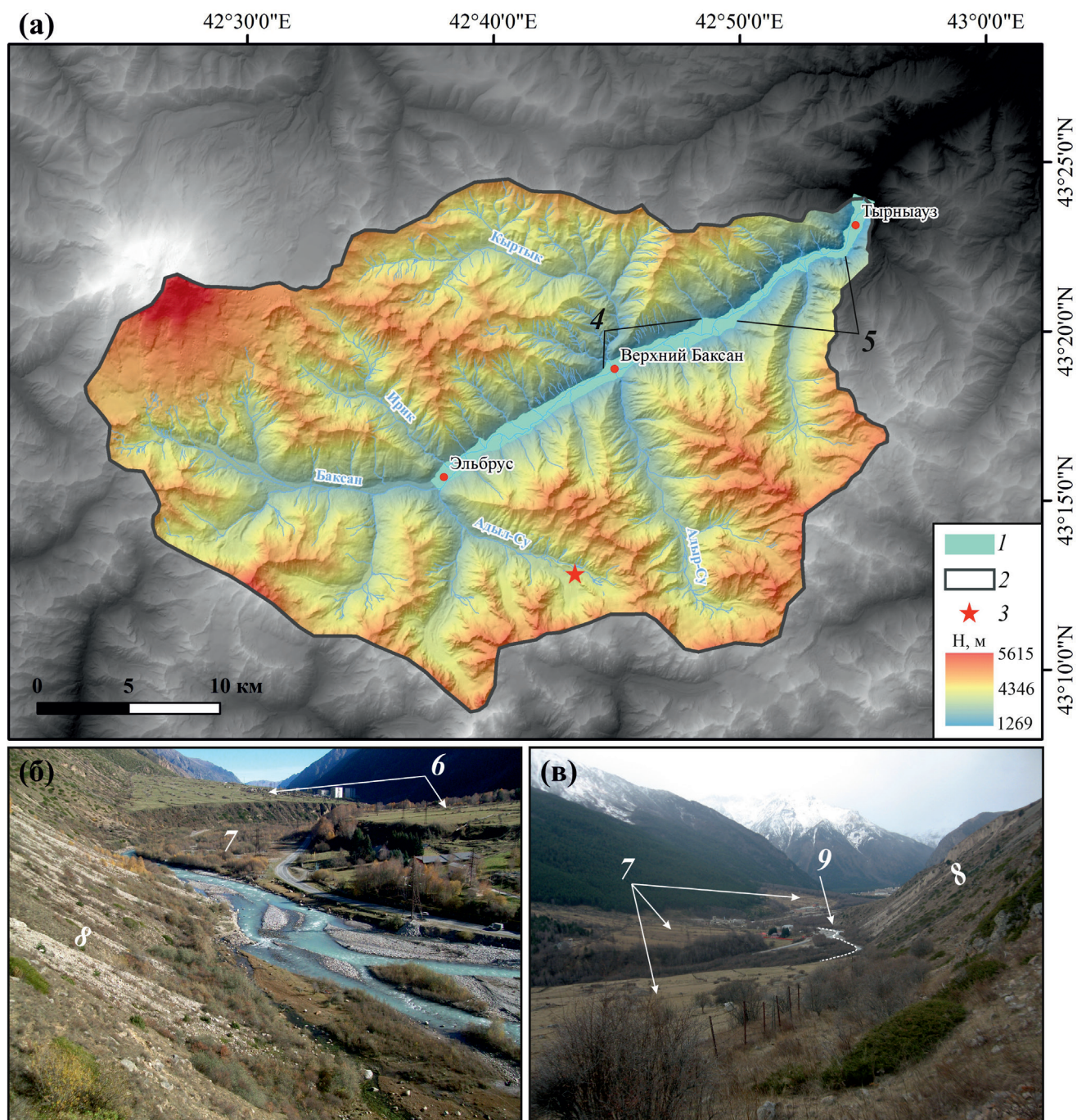


Рис. 2. Объект исследования: (а) – расположение исследуемого участка дна долины р. Баксан в пределах водосборного бассейна створа Тырныауз (Copernicus..., 2024), (б, в) – рельеф дна долины р. Баксан (фото И. В. Крыленко): 1 – исследуемый участок дна долины р. Баксан; 2 – водосборный бассейн створа Тырныауз; 3 – место прорыва оз. Башкара; 4 – Верхнебаксанская межгорная котловина; 5 – Эльжуртинская теснина; 6 – конусы выноса; 7 – низкая пойма; 8 – коллювиальный шлейф; 9 – русло р. Баксан.

Fig. 2. Study object: (a) – location of the explored Baksan valley bottom within the Tyrnyaуз gauge station catchment (Copernicus..., 2024), (б, в) – landforms of the Baksan River valley floor (photo by I. V. Krylenko): 1 – explored Baksan valley bottom; 2 – Tyrnyaуз gauge station catchment; 3 – Bashkara Lake outburst site; 4 – Verkhnebakskanskaya intermountain basin; 5 – Elzhurtinskaya Gorge; 6 – alluvial fans; 7 – low floodplain; 8 – colluvial apron; 9 – Baksan River channel.

выноса р. Адыл-Су (Черноморец и др., 2018). По принимающей р. Баксан прошел селевой паводок, который, вероятно, неоднократно испытывал на своем пути трансформацию из селевого в водный вследствие падения эрозионно-транспортирующей способности потока в местах снижения уклонов русла и четковидных расширений дна долины (Посаженикова и др., 2026). По данным моделирования MIKE11 максимальный расход воды паводка в г. Тырнауз достигал $240 \text{ м}^3/\text{с}$, что более чем в 2 раза превышает среднегогодежный максимальный расход р. Баксан на гидропосте г. Тырнауз за рассматриваемый период.

На фоне высокого половодья, обусловленного накоплением значительных объемов талых ледниковых вод за период экстремально жаркой погоды, интенсивный ливень 5 июля 2018 г. спровоцировал мощный паводок в верховьях бассейна р. Баксан (Чигирова, 2024). Наиболее разрушительное воздействие данное событие оказало на участки русла, расположенные выше по течению от впадения р. Адыл-Су, однако, размывы берега с поврежденными объектами инфраструктуры встречались вплоть до г. Тырнауз. Паводок 2018 г. в настоящей работе не анализировался как отдельное событие, хотя он и внес определенные изменения в трансформацию русла на исследуемом участке за постселевой период 2017–2023 гг.

Стоит также отметить, что высокая уязвимость к экстремальным гидрологическим событиям характерна для всего бассейна р. Баксан, что подчеркивает актуальность изучаемой проблемы. Показательным примером служат периодические сходы селей по р. Герхожан-Су (правый приток р. Баксан, впадающий в него в пределах г. Тырнауз). Вынос значительных объемов рыхлообломочного материала из этого бассейна регулярно приводит к подпруживанию основного русла р. Баксан и масштабным деформациям дна долины, как это произошло во время недавнего мощного селя в июле 2025 г. И хотя устье р. Герхожан-Су располагается на нижней границе детально исследуемого участка, последствия подобных событий наглядно

демонстрируют общую метастабильность русловой сети в горных регионах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Морфологические изменения русла р. Баксан за 40-летний период оценивались по разновременным космическим снимкам (табл. 1). Снимки считались репрезентативными из-за отсутствия иных геоморфологически эффективных селевых событий на исследуемом участке за рассматриваемый период. Для каждого снимка было проведено дешифрирование русла, островов и поймы. Под термином “пойма” подразумевалась низкая террасовидная поверхность, примыкающая к руслу, затопляемая в многоводную фазу режима реки с периодичностью 1–3 года и покрытая большей частью древесной растительностью (Чалов, 2008). Высокая пойма, определенная по высоте среднегогодежного уровня воды во время половодья и характеру освоения и испытывающая затопление раз в несколько десятков лет, в ходе морфометрического анализа не рассматривалась. Под “островами” понимались участки поймы в пределах русел. В свою очередь “русло” определялось как форма рельефа дна долины, по которой осуществляется речной сток при уровнях воды ниже бровки поймы (Чалов, 2008). Границы дна долины были проведены по подошве коренных склонов.

Для оценки морфометрических изменений за рассматриваемые периоды была проведена сегментация речной сети на относительно однородные участки по методике Ferencevic, Ashmore (2012) с той разницей, что в нашем исследовании из-за недостаточности данных для моделирования расходов воды был использован индекс мощности потока. На основе цифровой модели рельефа (ЦМР) открытого доступа FABDEM (Neal, Hawker, 2023) был получен векторный слой русла р. Баксан с известными плановыми координатами, высотой, площадью водосборного бассейна и расстоянием от источника селя для каждой точки. Для каждого сегмента по ЦМР были рассчитаны уклон русла

Таблица 1. Информация о космических снимках, использованных в работе

Table 1. Satellite imagery data

Дата съемки	Спутниковая система	Правообладатель	Разрешение, м
12.09.1984	KN-9 Hexagon	National Reconnaissance Office	~2.0
20.08.2016	SPOT 7	Airbus Defence and Space	1.5
14.09.2017			
27.09.2023	JL-1KF01	HEAD Aerospace Group	0.75

Таблица 2. Параметры для морфометрического и статистического анализа
Table 2. Morphometric and statistical analysis parameters

$A-s^*$	Расстояние от источника селевого паводка, км	nI	Количество островов, шт.
Ci	Коэффициент стесненности	S	Уклон русла, %
DA	Площадь водосборного бассейна, км ²	SPI	Индекс мощности потока
G	Геоморфологический тип русла	W	Ширина русла, м
M	Морфодинамический тип русла	Wr	Относительное изменение ширины русла
I	Площадь островов, м ²	ΔW	Абсолютное изменение ширины русла, м

Примечание. * – Нижний индекс у основного символа использовался для обозначения года (1984/2016/2017/2023).
Note. * – Subscript on the main symbol indicates the year (1984/2016/2017/2023).

и индекс мощности потока (SPI) согласно уравнению:

$$SPI = S \times \sqrt{A},$$

где S – уклон русла (тангенс угла наклона), безразмерный; A – площадь водосбора, м². Физический смысл данного индекса заключается в косвенной оценке эрозионно-транспортирующей способности потока. Чем выше локальный уклон русла и водосборная площадь, тем выше, при прочих равных, как потенциал к эрозии на этом участке русла, так и потенциал к транзиту наносов. В рамках данного исследования значения SPI не анализировались как самостоятельный фактор русловых деформаций, а использовались исключительно на методическом этапе для объективного выделения однородных сегментов русла по экстремумам данного показателя.

Были выделены дополнительные сегменты с учетом геологических (Геологическая карта..., 2004; Zelenin et al., 2022) и ландшафтных (Атлас..., 2008) данных, наличия притоков и стокорегулирующих сооружений, изменения уклона и ширины дна долины (Brierley, Fryirs, 2005; Rinaldi et al., 2013). Одновременно при выделении учитывалась морфологическая однородность участков русла на основе преобладания форм одного морфодинамического типа (Чалов, 2008).

Для каждого сегмента были определены геоморфологический и морфодинамический типы русел по классификации речных русел МГУ (Чалов, 1979, 2016). На основе отношения ширины поймы к ширине русла были выделены широкопойменные (≥ 3), адаптированные и врезанные (≤ 1) геоморфологические типы условий формирования русел. По морфодинамическому типу русла были разделены на: относительно прямолинейные, меандрирующие и разветвленные. Меандрирующие русла определялись по степени развитости излучин (≥ 1.15), разветвленные – по наличию осередков,

островов и суммарному увеличению ширины русла, маркирующему изменение структуры потока (Чалов, 2008).

Для каждого сегмента была определена серия морфометрических параметров, представленных в табл. 2. Уклон русла S , площадь водосборного бассейна DA , индекс мощности потока SPI и расстояние от источника селя $A-s$ были определены на основе FABDEM. По космическим снимкам (табл. 1) за каждый год были рассчитаны средняя ширина русла W и поймы F , как отношение площади сегмента к длине русла, и коэффициент стесненности Ci – отношение ширины дна долины к ширине русла. Были определены количество островов nI и их площадь I . Для количественной характеристики морфометрических изменений были рассчитаны абсолютное ΔW и относительное изменение ширины русла Wr . Для оценки селевой трансформации русла Wr рассчитывался как отношение ширины русла после к ширине русла до паводка. Для оценки постселевой трансформации русла за 6 лет Wr был рассчитан как:

$$Wr = \frac{W_{23}}{W_{17}}$$

где W_{23} и W_{17} – ширина русла в 2023 и 2017 гг. соответственно.

На точность определения всех упомянутых морфометрических параметров влияли ошибки, связанные с привязкой и разрешением космических снимков и дешифрированием флювиальных форм рельефа. Абсолютная погрешность составила 4–5 м.

Корреляционный анализ морфологических изменений русла, вызванных постселевой трансформацией, и факторов, потенциально контролирующих масштаб этих изменений, был выполнен с помощью ранговой корреляции Спирмена из-за асимметричного распределения данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Средняя ширина русла в 1984 г., пострадавшего от селевого паводка 1983 г., составляла 65 м, что соответствует 180% от средней ширины русла в 2016 г. (рис. 3). При этом относительно постселевой ширины русла 2017 г., по которому прошел селевой паводок 1 сентября 2017 г., W_{84} (см. табл. 2) составила 127%.

Рассмотрение отдельно двух групп участков, расположенных выше и ниже по течению от впадения р. Адыр-Су — источника селевого паводка 1983 г., — показало, что за период с 1984 по 2016 г. наблюдалось сужение русла, при этом более интенсивно оно протекало ниже впадения р. Адыр-Су, т. е. на участках, подвергшихся воздействию селевого паводка (табл. 3). Это позволяет говорить не только о естественном развитии русловых процессов, но и о способности трансформированного вследствие экстремального гидрологического события русла к поглощению “возмущений” без перехода в необратимое новое состояние и дальнейшему восстановлению прежних морфологических параметров.

Основной реакцией на селевой паводок 1 сентября 2017 г., сформированный прорывом ледникового оз. Башкара, было расширение русла вследствие активизации боковой эрозии. Увеличение ширины русла произошло на 75% протяженности исследуемого участка в среднем на 15 м при

среднем и медианном значениях относительного изменения ширины $Wr = 1.6$ и 1.4 соответственно (рис. 3). Расширение русла происходило лишь в пределах Верхнебаксанской межгорной котловины, характеризовавшейся до селевого события более высокими значениями ширины как дна долины, так и русла, и более низкими уклонами

Таблица 3. Изменение ширины русла р. Баксан за период 1984–2023 гг. выше и ниже по течению устья р. Адыр-Су, в бассейне которой был сформирован катастрофический сель 1983 г.

Table 3. Channel width changes upstream and downstream of the Adyr-Su River confluence (1984–2023), following the 1983 catastrophic debris flow in its basin

1984	2016	2017	2023
Средняя ширина русла р. Баксан выше по течению от устья р. Адыр-Су			
40.1 м	27.5 м	49.7 м	51.7 м
100%	68.5%	124%	128.9%
Средняя ширина русла р. Баксан ниже по течению от устья р. Адыр-Су			
93.5 м	47.8 м	58.9 м	54.1 м
100%	51.1%	62.9%	57.9%

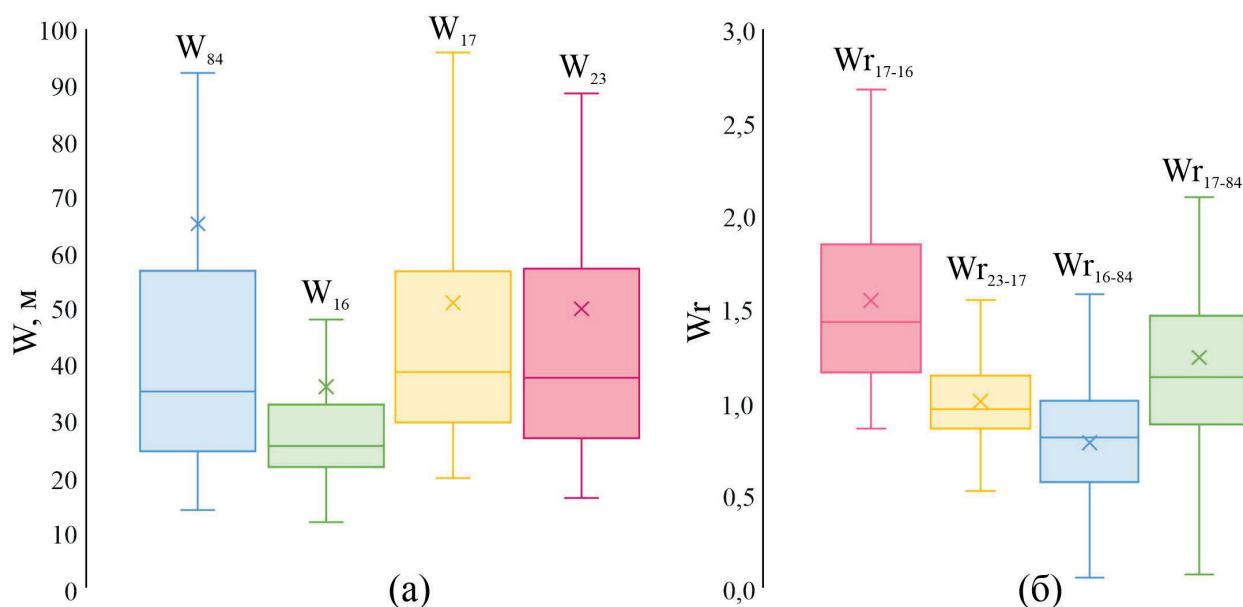


Рис. 3. Морфологические изменения русла р. Баксан за 1984–2023 гг.: (а) — ширина (W) русла в разные годы исследования, (б) — относительное изменение ширины (Wr) за разные периоды исследования. Условные обозначения даны в табл. 2.

Fig. 3. Morphological changes in the Baksan River channel from 1984 to 2023: (a) — channel width (W) for the study years, (б) — width ratio (Wr) for different study periods. Legend is given in tabl. 2.

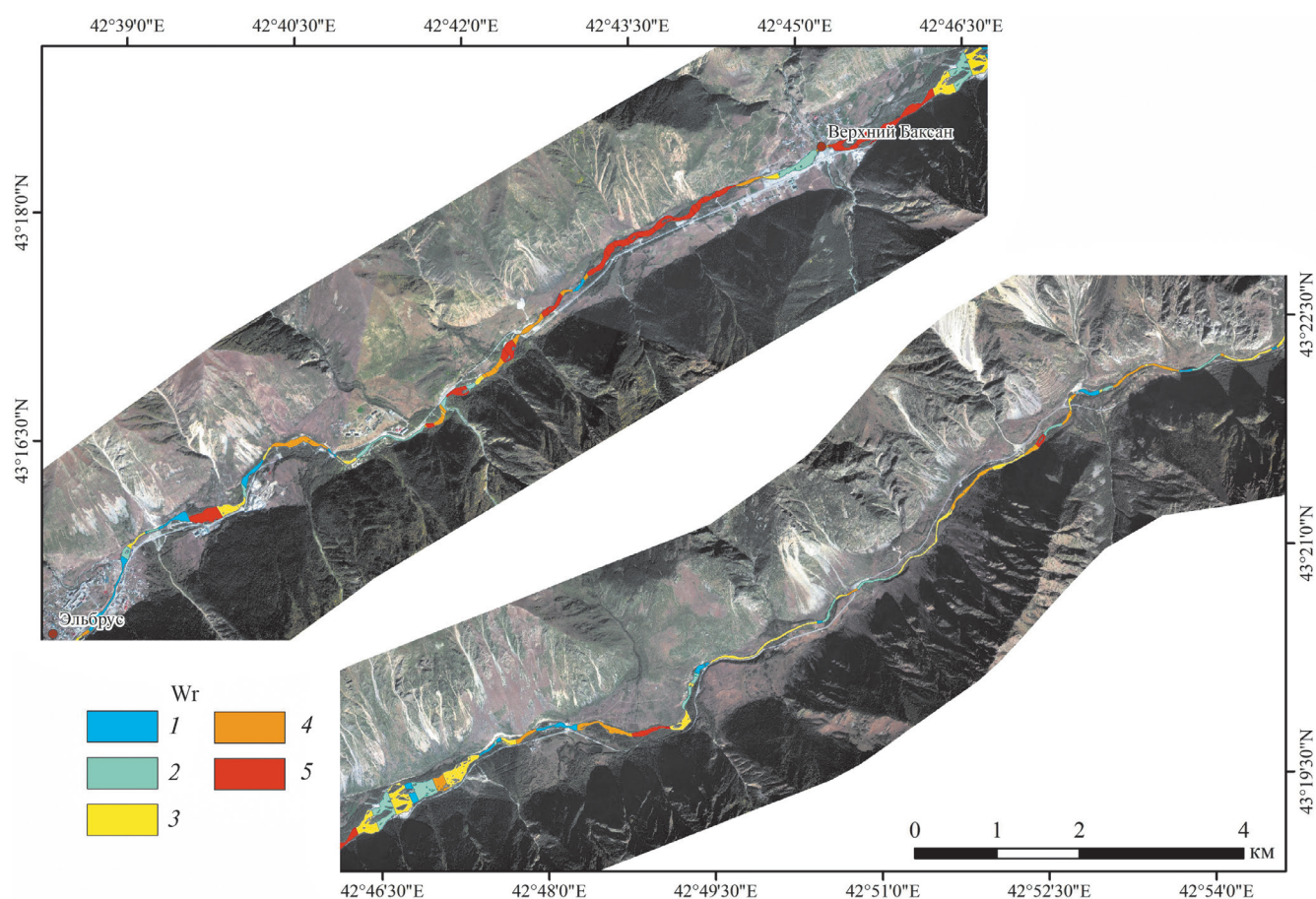


Рис. 4. Изменение ширины русла р. Баксан в 2023 г. спустя 6 лет после селевого паводка. *Относительное изменение ширины (Wr): 1 – 0.1–0.8, 2 – 0.8–0.9, 3 – 0.9–1.0, 4 – 1.0–1.2, 5 – 1.2–1.8.*

Fig. 4. Changes in the Baksan River channel width six years post-flood. *Width ratio (Wr): 1 – 0.1–0.8, 2 – 0.8–0.9, 3 – 0.9–1.0, 4 – 1.0–1.2, 5 – 1.2–1.8.*

и величинами эрозионно-транспортирующей способности потока. Расширение русла было сопряжено с изменениями его морфодинамического типа. Протяженность меандрирующих и разветвленных участков увеличилась на 8.7 и 2.5% соответственно, при сокращении доли относительно прямолинейных с 53.3 до 42.1%. Помимо зависимости от расстояния до источника селя, корреляционный анализ Спирмена показал положительную связь относительного изменения ширины русла с коэффициентом стесненности C_i (0.6) и отрицательную – с доселевой шириной русла W_{16} (–0.4) (Посаженикова и др., 2026).

Сопоставление космических снимков долины, зафиксировавших состояние дна долины сразу и спустя 6 лет после селевого события 2017 г. показало, что морфологические изменения произошли на 61% исследуемого участка русла. Для 33% участка наблюдалось сужение при среднем $Wr = 0.7$ (рис. 4). Значительная часть данных участков характеризовалась относительно узким поперечным

профилем русла в 2017 г., а также не претерпела изменений морфодинамического типа русла после селевого паводка (рис. 5), оставаясь во всех трех временных срезах исследования относительно прямолинейным. Сужение русла в основном было обусловлено распространением пионерной растительности на боковых отмелях, образованных после селевого паводка, что привело к постепенной трансформации отмелей в пойму.

На 28% протяженности русла наблюдалось его расширение при среднем относительном изменении ширины 1.3. Значительная часть сегментов русла претерпела переход от относительно прямолинейного типа к меандрирующему или разветвленному сразу после селевого паводка. Так, изменение структуры потока в большинстве случаев было необратимым: сформированные в 2017 г. разветвления и излучины продолжили развиваться при паводках среднесезонной водности и, соответственно, происходил размыв вогнутых берегов.

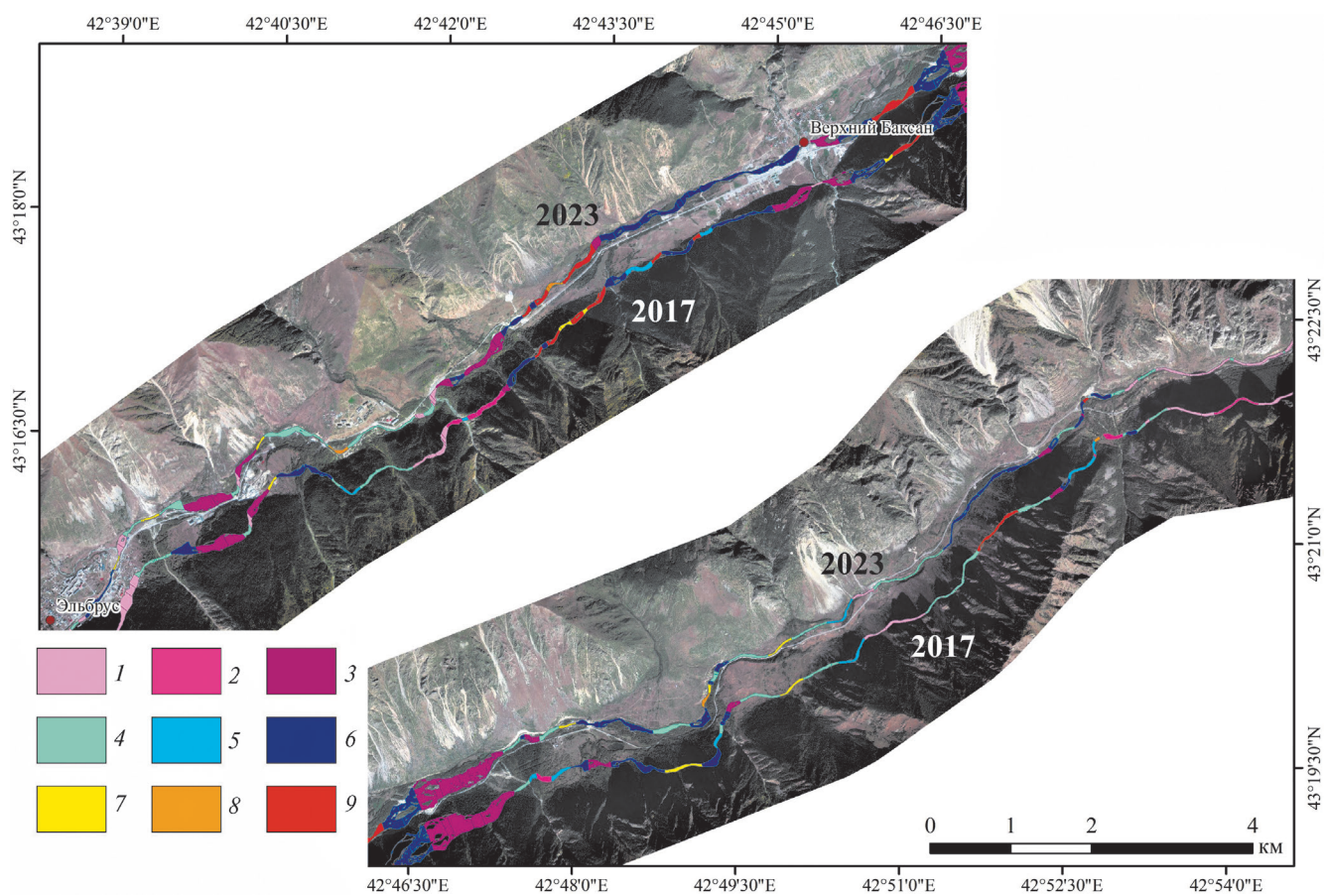


Рис. 5. Изменение морфодинамических типов русла р. Баксан за 2017–2023 гг.: 1 – врезанное относительно прямолинейное русло; 2 – врезанное меандрирующее; 3 – врезанное разветвленное; 4 – адаптированное относительно прямолинейное; 5 – адаптированное меандрирующее; 6 – адаптированное разветвленное; 7 – широкопойменное относительно прямолинейное; 8 – широкопойменное меандрирующее; 9 – широкопойменное разветвленное.

Fig. 5. Changes in the morphodynamic channel patterns of the Baksan River in 2017–2023.: 1 – incised straight; 2 – incised meandering; 3 – incised braided; 4 – adapted straight; 5 – adapted meandering; 6 – adapted braided; 7 – wide floodplain straight; 8 – wide floodplain meandering; 9 – wide floodplain braided.

Анализ изменений типа русла показал (рис. 5), что за период 2017–2023 гг. на 22% исследуемого участка русла сменился геоморфологический тип, в половине случаев произошел переход от врезанных к адаптированным руслам. Так, расширение русла за исследуемый период происходило за счет образования пойм на месте отмелей, сформированных вследствие селевого паводка. На 26% участка исследования произошло изменение морфодинамического типа, из которых 46% пришлось на переход от разветвленного (22%) или меандрирующего (24%) типа к относительно прямолинейному. Данные участки обладали последним типом до селевого паводка, что демонстрирует положительную динамику восстановления русла. Однако для 51% участка наблюдался переход от меандрирующего или относительно прямолинейного русла к разветвленному. Данные участки характеризовались

наиболее существенным расширением в 2017 г. и, соответственно, изменением структуры потока вследствие селевого паводка.

Для поиска взаимосвязей между изменением морфологии русла в период 2017–2023 гг. и контролирующими факторами была проведена ранговая корреляция Спирмена для всех участков и отдельно по группам, испытавшим сужение и расширение (табл. 4). Для всей группы не было выявлено достоверных связей. Это обусловлено тем, что в зависимости от направленности изменения ширины русла меняется знак корреляции, а также тем, что 39% участков сохранили прежние морфометрические параметры ($0.9 \leq W_r \leq 1.1$). Группа участков с $W_r > 1.1$ обладала умеренной положительной связью с морфологическим типом русла и его шириной в 2017 г: расширение испытывали более широкие меандрирующие и разветвленные русла. При

Таблица 4. Матрица ранговой корреляции Спирмена между относительным изменением ширины за 2017–2023 гг. и морфометрическими параметрами для всего исследуемого участка, для групп участков, испытавших расширение ($Wr > 1.1$) и сужение ($Wr < 0.9$)

Table 4. Spearman’s rank correlation matrix for the width ratio (Wr , 2017–2023) and morphometric parameters across the entire study reach, widened segments ($Wr > 1.1$), and narrowed segments ($Wr < 0.9$)

Участок	Параметр	W_{17}	G_{17}	M_{17}	I_{17}	nI_{17}	Ci_{17}	DA	S	Wr_{17-16}
Все участки	Wr_{23-17}	−0.19	0.31*	0.13	0.13	0.09	0.14	0.06	0.00	0.02
	ΔW_{23-17}	−0.28	0.35	0.07	0.06	0.01	0.21	0.00	0.05	0.04
$Wr > 1.1$	Wr_{23-17}	0.37	0.35	0.43	0.20	0.20	−0.29	−0.03	0.07	0.21
	ΔW_{23-17}	0.70	0.26	0.58	0.37	0.35	−0.50	−0.16	0.14	0.23
$Wr < 0.9$	Wr_{23-17}	−0.23	0.04	−0.11	−0.10	−0.09	0.22	0.13	−0.29	−0.21
	ΔW_{23-17}	−0.84	0.22	−0.46	−0.52	−0.52	0.57	0.32	−0.11	−0.28

Примечание. Красный цвет – корреляция ≥ 0.55 , розовый – $0.3 \leq x < 0.5$, белый – $-0.3 < x < 0.3$, голубой – $-0.5 \leq x < -0.3$, синий – $x \leq -0.5$.
Note. Red indicates correlation ≥ 0.55 ; pink indicates $0.3 \leq x < 0.5$; white indicates $-0.3 < x < 0.3$; light blue indicates $-0.5 \leq x < -0.3$; blue indicates $x \leq -0.5$.

сопоставлении постселевого изменения ширины русла с коэффициентом стесненности по сегментам было выявлено, что наибольшее расширение испытали участки, приуроченные к четковидным расширениям днища долины р. Баксан, в частности, к Верхнебаксанской котловине (доп. материалы). Группа участков с $Wr < 0.9$ тяготели к более узким относительно прямолинейным руслам.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Общей тенденцией развития русла р. Баксан с 1984 по 2016 гг. было его сужение, что обусловлено не только проявлением устойчивости системы к селевым событиям, но и ее откликом на гидрологические изменения вследствие деградации оледенения Большого Кавказа. Исследование режима рек показывает, что пик ледникового стока уже пройден и в настоящее время наблюдается устойчивое снижение среднемесячных расходов воды на 4–6% за десятилетие (Rets et al., 2020). Наблюдения за горизонтальными русловыми деформациями р. Баксан в межселевой период показывают их ограниченный характер распространения и низкие скорости, несмотря на периоды повышенной водности (1979–1989, 2000–2007), согласующиеся с климатическими циклами увеличения количества осадков (Виноградова, Виноградова, 2013). В свою очередь, прохождение селевых паводков в совокупности с интенсификацией экстремальных дождей в средних широтах (Groisman et al., 2005), приводит к мощным перестройкам руслового рельефа (Богомолов и др., 2002; Виноградова и др., 2007), несмотря на ослабление

ледникового стока. Участвовавшие температурные аномалии (Coumou, Rahmstorf, 2012) и деградация оледенения повышают уязвимость ландшафтов, выводят рельеф из состояния динамического равновесия, из-за чего метастабильное состояние русел становится характерной особенностью современных высокогорных долин.
Данное исследование подтвердило консенсус (Krapesch et al., 2011; Brenna et al., 2023; Liébault et al., 2024), что стесненность долины и исходная ширина русла являются критическими переменными, определяющими величину расширения и устойчивость русел в ответ на прохождение селевых паводков. Узкие, относительно прямолинейные русла в пределах широкого дна долины, оказались наиболее чувствительными к импульсному возмущению. Выявленная в исследовании зависимость степени трансформации от коэффициента стесненности находит подтверждение в мета-анализе Ruiz-Villanueva et al. (2023), охватывающем более 1500 участков рек Европы. Данные по р. Баксан укладываются в общий тренд для горных рек: частично стесненные участки демонстрируют наибольшую уязвимость и максимальные относительные изменения ширины, что также согласуется с результатами Surian et al. (2016).
Вероятно, экстремальное расширение в этих узких участках русла связано с переходом водного потока в селевой с концентрацией наносов свыше 40% (Iverson, 2014). Как показывают исследования Brenna et al. (2023), именно селевой транспорт наносов вызывает аномальное расширение, превышающее прогнозы, основанные только на гидравлике.

Кроме того, согласно Cook et al. (2018), энергия такого потока позволяет разрушать валунную оттоку дна, обычно защищающую русло от эрозии. Это запускает механизм необратимой перестройки морфологии: за 6 лет постселевой трансформации устойчивость таких участков русла р. Баксан не проявилась, и вместо восстановления наблюдалось динамическое развитие новой разветвленной системы с дальнейшим увеличением ширины.

Противоположная картина — восстановление доселевой морфологии — была характерна для участков, поглотивших часть импульсного возмущения. Высокая устойчивость отмечалась в четковидных сужениях дна долины, особенно на участках с крутыми склонами. Здесь энергия паводка расходовалась на транзит наносов, а не на аккумуляцию, поэтому система не переходила к новому состоянию, и впоследствии русло сужалось. Это соответствует выявленному тренду 1984–2016 гг. на снижение максимальных расходов воды (рис. 1). Отсутствие крупных паводков способствовало быстро зарастанию пойм.

Тем не менее, продолжающееся спустя 6 лет расширение, наблюдаемое на 28% протяженности русла, указывает на длительный период релаксации системы. Это согласуется с выводами Scorpio и Comiti (2024) для рек Северных Апеннин, где процесс восстановления через 5 лет после события также носил ограниченный характер. Вероятно, данные участки р. Баксан испытывают прохождение “волны наносов” (sediment slug), которая, согласно Moody и Martin (2009), может мигрировать вниз по течению годами, вызывая вторичную морфологическую нестабильность даже в отсутствии новых экстремальных событий.

В оцениваемый 40-летний период (1983–2023 гг.) мощность селевых паводков, а также их периодичность остается сопоставимой, несмотря на климатические изменения и сопутствующее им уменьшение стока (Rets et al., 2020). Это подтверждается как анализом двух ключевых селевых событий 1983 и 2017 гг., так и исследованиями одной из самых сеопасных рек Северного Кавказа, Герхожан-Су, впадающей в р. Баксан ниже по течению рассматриваемого участка. Наиболее разрушительными были гляциальные сели р. Герхожан-Су 2000, 2011, 2017 (Докукин и др., 2018) и 2025 гг. .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной реакцией р. Баксан на экстремальные паводки, возникшие вследствие гляцио-ливневых селей, было увеличение ширины русла вследствие эрозии берегов, сокращение проективной площади растительного покрова и отложение наносов в русло и на бывшей пойме. В периоды между ЭГС на

фоне стандартных руслоформирующих расходов русло р. Баксан испытывало сужение, что указывает на преобладание процессов врезания над боковой эрозией. За 30-летнюю стадию межкастрофической эволюции средняя ширина русла сократилась почти в два раза.

Селевой паводок, сформированный прорывом ледникового оз. Башкара в долине р. Адыл-Су, спровоцировал расширение русла р. Баксан ниже впадения р. Адыл-Су и до створа Тырныауз в среднем в 1.6 раз. Наиболее чувствительны к импульсному возмущению были исходно более узкие русла с наибольшим коэффициентом стесненности, их расширение сопровождалось сменой относительно прямолинейного морфодинамического типа меандрирующим или разветвленным. Такие участки в течение прошедших 6 лет характеризовались дальнейшим расширением на 25–30% и развивались как метастабильная система, испытывавшая переход в новое состояние.

Русла с большей шириной и сильной ограниченностью бортами долины характеризовались сопротивлением к импульсному возмущению (селевому паводку), что было выражено в отсутствии изменений морфодинамического типа русла и положительным трендом восстановления морфологии: за исследуемый 6-летний постселевой период ширина таких участков русла в среднем сократилась на 20–25%.

Несмотря на устойчивый тренд снижения расходов воды, обусловленный преимущественно сокращением ледникового питания, значимые перестройки русла обусловлены прохождением экстремальных селевых паводков, мощность которых регулируется локальными условиями формирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас природно-техногенных опасностей Кабардино-Балкарской Республики (2005) Под ред. В.В. Разумова. М.: ИЦ “Елима”. 244 с.
- Богомолов А.Л., Виноградова Н.Н., Власов Б.Н. и др. (2002) Влияние катастрофических селей в г. Тырныаузе на русло р. Баксан. *Геоморфология*. № 1. С. 65–74.
- Божинский А.Н., Запороженко Э.В., Черноморец С.С. (2008) Моделирование катастрофических селей в бассейне р. Куллумкол-Су (Кавказ). *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. № 5. С. 31–35.
- Виноградова Н.Н., Крыленко И.В., Сурков В.В. (2007) Некоторые закономерности руслоформирующей деятельности горной реки в ее верховьях (на примере р. Баксан). *Геоморфология*. № 2. С. 49–56.
- Виноградова О.В., Виноградова Н.Н. (2013) Реакция горных рек Кавказа на изменения климата. *Вестник*

- Московского университета. Серия 5. География. № 4. С. 44–48.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Издание второе. Кавказская серия. Лист К-38-I, VII (Кисловодск) (2004) Под ред. Н.Л. Энна. СПб.: ФГУГП Кавказгеолсъемка. 2004. 1 л.
- Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Богаченко Е.М. и др. (2018) Селевые потоки 14–15 августа 2017 г. в бассейне р. Герхожан-Су (Центральный Кавказ): условия и причины формирования, динамика, последствия. *ГеоРиск*. Т. 12. № 3. С. 82–94.
- Кидяева В.М., Петраков Д.А., Крыленко И.Н. и др. (2018) Опыт моделирования прорыва Башкаринских озер. *ГеоРиск*. Т. 12. № 2. С. 38–46.
- Корнилова Е.Д., Крыленко И.Н., Рец Е.П. и др. (2023) Моделирование водного режима рек с высокой долей ледникового питания (на примере бассейна р. Баксан). *Водные ресурсы*. Т. 50. № 4. С. 477–484. <https://doi.org/10.31857/S0321059623040144>
- Куксина Л.В., Голосов В.Н., Кузнецова Ю.С. (2017) Ливневые паводки в горах: изученность, распространение, факторы формирования. *География и природные ресурсы*. № 1. С. 25–35. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-1\(25-35\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(25-35))
- Посаженикова В.С., Голосов В.Н., Харченко С.В. (2026) Селевая трансформация рельефа днища долины р. Баксан вследствие прорыва озера Башкара (Приэльбрусье). *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. № 1. С. 88–101. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.81.1.8>
- Сидорчук А.Ю. (2025) Формирование продольного профиля реки при существенном влиянии склоновых процессов (на примере р. Ваипаоа, Новая Зеландия). *Геоморфология и палеогеография*. Т. 56. № 3. С. 359–371. <https://doi.org/10.31857/S2949178925030014>
- Солодова А.С., Петраков Д.А., Пуганов К.А. (2024) Моделирование селевого потока при прорыве оз. Башкара в 2017 г. *Лёд и Снег*. Т. 64. № 4. С. 527–542. <https://doi.org/10.31857/S2076673424040043>
- Чалов Р.С. (1979) Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та. 232 с.
- Чалов Р.С. (2008) Русловедение: теория, география, практика. Том 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ. 608 с.
- Чалов Р.С. (2016) Русловые процессы (русловедение). М.: ИНФРА-М. 569 с.
- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А. и др. (2018) Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года. *Криосфера Земли*. Т. 22. № 2. С. 70–80. [http://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2\(70-80\)](http://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2(70-80))
- Чигирова Л.Б. (2024) О паводке 5 июля 2018 года в бассейне р. Баксан: причины, последствия. В сб.: *Сборник докладов Всероссийской открытой конференции по исследованиям атмосферных и склоновых стихийных явлений в условиях современного изменения климата, посвященной 190-летию создания Гидрометеорологической службы России и 90-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР*. Нальчик: Принт Центр. С. 327–331.
- Brenna A., Marchi L., Borga M. et al. (2023) What drives major channel widening in mountain rivers during floods? The role of debris floods during a high-magnitude event. *Geomorphology*. Vol. 430. P. 108650. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108650>
- Brierley G.J., Fryirs K.A. (2013) *Geomorphology and river management: applications of the river styles framework*. Chichester: John Wiley & Sons. 398 p.
- Church M., Jakob M. (2020) What is a debris flood? *Water Resour. Res.* Vol. 56. No. 8. e2020WR027144. <https://doi.org/10.1029/2020WR027144>
- Cook K.L., Andermann C., Gimbert F. et al. (2018) Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya. *Science*. Vol. 362. No. 6410. P. 53–57. <https://doi.org/10.1126/science.aat4981>
- Copernicus Global Digital Elevation Model (2024) – European Space Agency [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB> (дата обращения: 20.03.2025)
- Costa J.E., Connor J.E. (1995) Geomorphically effective floods. In: J.E. Costa, A.J. Miller, K.W. Potter, P.R. Wilcock (Eds.) *Natural and Anthropogenic Influences in Fluvial Geomorphology*. Vol. 89. American Geophysical union. P. 45–56. <https://doi.org/10.1029/GM089p0045>
- Coumou D., Rahmstorf S. (2012) A decade of weather extremes. *Nat. Clim. Change*. Vol. 2. P. 491–496. <https://doi.org/10.1038/nclimate1452>
- Ferencevic M.V., Ashmore P. (2012) Creating and evaluating digital elevation model-based stream-power map as a stream assessment tool. *River Res. and Applications*. Vol. 28. No. 9. P. 1394–1416. <https://doi.org/10.1002/rra.1523>
- Fuller I.C., Gilvear D.J., Thoms M.C., Greenwood M.T. (2019) Framing resilience for river geomorphology: Reinventing the wheel? *River Res. and Applications*. Vol. 35. P. 91–106. <https://doi.org/10.1002/rra.3384>
- Groisman P.Y., Knight R.W., Easterling D.R. et al. (2005). Trends in intense precipitation in the climate record. *J. Clim.* Vol. 18. No. 9. P. 1326–1350. <https://doi.org/10.1175/JCLI3339.1>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. (2020) The ERA5 global reanalysis. *Q. J.R. Meteorol. Soc.* Vol. 146. No. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hodgson D., McDonald J.L., Hosken D.J. (2015) What do you mean, ‘resilient’? *Trends Ecol. Evol.* Vol. 30. P. 503–506. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.06.010>
- Iverson R.M. (2014). Debris flows: behaviour and hazard assessment. *Geology today*. Vol. 30. No. 1. P. 15–20. <https://doi.org/10.1111/gto.12037>
- Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P. et al. (2021) Modeling of Extreme Hydrological Events in the Baksan

- River Basin, the Central Caucasus, Russia. *Hydrology*. Vol. 8. Iss. 1.
<https://doi.org/10.3390/hydrology8010024>
- Krapesch G., Hauer C., Habersack H. (2011) Scale orientated analysis of river width changes due to extreme flood hazards. *Natural Hazards and Earth System Sci.* Vol. 11. No. 8. P. 2137–2147.
<https://doi.org/10.5194/nhess-11-2137-2011>
- Liébault F., Piégay H., Jautzy T. et al. (2024) Channel change during catastrophic flood: Example of Storm Alex in the Vésudie and Roya valleys. *Geomorphology*. Vol. 446. 109008.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109008>
- Magilligan F.J., Buraas E.M., Renshaw C.E. (2015) The efficacy of stream power and flow duration on geomorphic responses to catastrophic flooding. *Geomorphology*. Vol. 228. P. 175–188.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.08.016>
- Magilligan F.J., Phillips J.D., Gomez B., James L.A. (1998) Geomorphic and sedimentological controls on the effectiveness of an extreme flood. *The J. of Geology*. Vol. 106. P. 87–96.
<https://doi.org/10.1086/516009>
- Moody J.A., Martin D.A. (2009) Synthesis of sediment yields after wildland fire in different rainfall regimes in the western United States. *Int. J. Wildland Fire*. Vol. 18. No. 1. P. 96–115.
<https://doi.org/10.1071/WF07162>
- Neal J., Hawker L. FABDEM V1–2 [Электронный ресурс]. URL:
<https://doi.org/10.5523/bris.s5hqmjdj8yo2ibzi9b4ew3sn>
(дата обращения: 15.05.2025)
- Phillips J.D., Van Dyke C. (2016) Principles of geomorphic disturbance and recovery in response to storms. *Earth Surf. Processes Landforms*. Vol. 41. P. 971–979.
<https://doi.org/10.1002/esp.3912>
- Piégay H., Chabot A., Le Lay Y.F. (2020) Some comments about resilience: From cyclicity to trajectory, a shift in living and nonliving system theory. *Geomorphology*. Vol. 367. 106527.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.018>
- Räpple B., Piégay H., Stella J.C., Mercier D. (2017) What drives riparian vegetation encroachment in braided river channels at patch to reach scales? Insights from annual airborne surveys (Drôme River, SE France, 2005–2011). *Ecohydrology*. Vol. 10. e1886.
<https://doi.org/10.1002/eco.1886>
- Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussettini M. (2013) A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: The Morphological Quality Index (MQI). *Geomorphology*. Vol. 180. P. 96–108.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.09.009>
- Ruiz-Villanueva V., Piégay H., Scorpio V. et al. (2023) River widening in mountain and foothill areas during floods: Insights from a meta-analysis of 51 European Rivers. *Sci. Total Environ.* Vol. 903. 166103.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166103>
- Schumm S.A. (1979) Geomorphic thresholds: the concept and its applications. *Transactions of the Institute of British Geographers*. Vol. 4. No. 4. P. 485–515.
<https://doi.org/10.2307/622211>
- Scorpio V., Comiti F. (2024) Channel changes during and after extreme floods in two catchments of the Northern Apennines (Italy). *Geomorphology*. Vol. 463. 109355.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109355>
- Surian N., Righini M., Lucía A. et al. (2016). Channel response to extreme floods: Insights on controlling factors from six mountain rivers in northern Apennines, Italy. *Geomorphology*. Vol. 272. P. 78–91.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.002>
- Tielidze L.G., Wheate R.D. (2018) The Greater Caucasus Glacier Inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan). *The Cryosphere*. Vol. 12. P. 81–94.
<https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018>
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M. (2019) Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st century. *Int. J. of Climatology*. Vol. 39. No. 12. P. 4703–4720.
<https://doi.org/10.1002/joc.6101>
- Wilford D.J., Sakals M.E., Innes J.L. et al. (2004) Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*. Vol. 1. P. 61–66.
<https://doi.org/10.1007/s10346-003-0002-0>
- Zelenin E., Bachmanov D., Garipova S. et al. (2022) The database of the active faults of Eurasia (AFEAD): Ontology and design behind the continental-scale dataset. *Earth System Sci. Data Discussions*. Vol. 14. P. 4489–4503.
<https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>

REFERENCES

- Bogomolov A.L., Vinogradova N.N., Vlasov B.N. et al. (2002) Influence of catastrophic debris flows in Tynyauz town on the Baksan River channel. *Geomorfologiya*. No. 1. P. 65–74. (in Russ.).
- Bozhinskiy A.N., Zaporozhchenko E.V., Chernomorets S.S. (2008) Simulation of catastrophic mud-flows in the Kullumkol-Su River basin (The Caucasus). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. No. 5. P. 31–35. (in Russ.).
- Brenna A., Marchi L., Borga M. et al. (2023) What drives major channel widening in mountain rivers during floods? The role of debris floods during a high-magnitude event. *Geomorphology*. Vol. 430. P. 108650.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108650>
- Brierley G.J., Fryirs K.A. (2013) Geomorphology and river management: applications of the river styles framework. Chichester: John Wiley & Sons. 398 p.
- Chalov R.S. (1979) Geograficheskie issledovaniya ruslovykh protsessov (Geographical studies of channel processes). Moscow: MGU (Publ.). 232 p. (in Russ.).
- Chalov R.S. (2008) Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. Tom 1. Ruslovye protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel (River channel science: theory, geography, practice. Vol. 1.

- Riverbed processes, mechanism, forms of manifestations and conditions of formations of riverbeds). Moscow: LKI (Publ.). 608 p. (in Russ.).
- Chalov R.S. (2016) Ruslovye protsessy (ruslovedenie) (Channel processes (channel studies)). Moscow: INFA-M (Publ.). 569 p. (in Russ.).
- Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Aleynikov A.A. et al. (2018). The outburst of Bashkara glacier lake (Central Caucasus, Russia) on September 1, 2017. *Earth's Cryosphere*. Vol. 22. No. 2. P. 61–70.
[https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2018-2\(61-70\)](https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2018-2(61-70))
- Chigirova L.B. (2024) Regarding the flood on July 5, 2018 in the Baksan River basin: causes, consequences. In: *Sbornik dokladov Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii po issledovaniyam atmosferynykh i sklonovnykh stikhiinykh yavlenii v usloviyakh sovremennogo izmeneniya klimata, posvyashchennoi 190-letiyu sozdaniya Gidrometeorologicheskoi sluzhby Rossii i 90-letiyu El'brusskoi vysokogornoj kompleksnoi ekspeditsii AN SSSR*. Nalchik: Print Center (Publ.). P. 327–331. (in Russ.).
- Church M., Jakob M. (2020) What is a debris flood? *Water Resour. Res.* Vol. 56. No. 8. e2020WR027144.
<https://doi.org/10.1029/2020WR027144>
- Cook K.L., Andermann C., Gimbert F. et al. (2018) Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya. *Science*. Vol. 362. No. 6410, P. 53–57.
<https://doi.org/10.1126/science.aat4981>
- Copernicus Global Digital Elevation Model (2024) – European Space Agency [Electronic data]. Access way: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB> (access date: 2025-03-20).
- Costa J.E., Connor J.E. (1995) Geomorphically effective floods. In: J.E. Costa, A.J. Miller, K.W. Potter, P.R. Wilcock (Eds.) *Natural and Anthropogenic Influences in Fluvial Geomorphology*. Vol. 89. American Geophysical union. P. 45–56.
<https://doi.org/10.1029/GM089p0045>
- Coumou D., Rahmstorf S. (2012) A decade of weather extremes. *Nat. Clim. Change*. Vol. 2. P. 491–496.
<https://doi.org/10.1038/nclimate1452>
- Dokukin M.D., Bekkiev M. Yu., Bogachenko E.M. et al. (2018) Debris flows on August 14–15, 2017 in the Gerhozan-Su River basin (Central Caucasus): conditions and causes of formation, dynamics, consequences. *GeoRisk*. Vol. 12. No. 3. P. 82–94. (in Russ.).
- Enn N.L. (Ed). (2004) Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:200000. Izdanie vtoroe. Kavkazskaya seriya. List K-38-I, VII (Kislovodsk). (The 1:200 000 State Geological Map of the Russian Federation, 2nd ed., Ser. Caucasian. Sheet K-38-I, VII (Kislovodsk)). Sankt-Petersburg: FGUGP Kavkazgeolsemka (Publ.). 1 p. (in Russ.).
- FERENCEVIC M.V., Ashmore P. (2012) Creating and evaluating digital elevation model-based stream-power map as a stream assessment tool. *River Res. and Applications*. Vol. 28. No. 9. P. 1394–1416.
<https://doi.org/10.1002/rra.1523>
- Fuller I.C., Gilvear D.J., Thoms M.C., Greenwood M.T. (2019) Framing resilience for river geomorphology: Reinventing the wheel? *River Res. and Applications*. Vol. 35. P. 91–106.
<https://doi.org/10.1002/rra.3384>
- Groisman P.Y., Knight R.W., Easterling D.R. et al. (2005). Trends in intense precipitation in the climate record. *J. Clim.* Vol. 18. No. 9. P. 1326–1350.
<https://doi.org/10.1175/JCLI3339.1>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. (2020) The ERA5 global reanalysis. *Q. J.R. Meteorol. Soc.* Vol. 146. No. 730. P. 1999–2049.
<https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hodgson D., McDonald J.L., Hosken D.J. (2015) What do you mean, 'resilient'? *Trends Ecol. Evol.* Vol. 30. P. 503–506.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.06.010>
- Iverson R.M. (2014). Debris flows: behaviour and hazard assessment. *Geology today*. Vol. 30. No. 1. P. 15–20.
<https://doi.org/10.1111/gto.12037>
- Kidyayeva V.M., Petrakov D.A., Krylenko I.N. et al. (2018) Experience in modeling the breakthrough of the Bashkarinsky lakes. *GeoRisk*. Vol. 12. No. 2. P. 38–46. (in Russ.).
- Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P. et al. (2021) Modeling of Extreme Hydrological Events in the Baksan River Basin, the Central Caucasus, Russia. *Hydrology*. Vol. 8. Iss. 1.
<https://doi.org/10.3390/hydrology8010024>
- Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P. et al. (2023). Simulating runoff regime in a glaciated high-mountainous basin: a case study of the Baksan River (Caucasus, Russia). *Water Resources*. Vol. 50. No. 4. P. 569–576.
<https://doi.org/10.1134/S0097807823040140>
- Krapesch G., Hauer C., Habersack H. (2011) Scale orientated analysis of river width changes due to extreme flood hazards. *Natural Hazards and Earth System Sci.* Vol. 11. No. 8. P. 2137–2147.
<https://doi.org/10.5194/nhess-11-2137-2011>
- Kuksina L.V., Golosov V.N., Kuznetsova Y.S. (2017) Cloudburst floods in mountains: state of knowledge, occurrence, factors of formation. *Geography and natural resources*. Vol. 38. No. 1. P. 20–29.
<https://doi.org/10.1134/S1875372817010036>
- Liébault F., Piégay H., Jautzy T. et al. (2024) Channel change during catastrophic flood: Example of Storm Alex in the Vesubie and Roya valleys. *Geomorphology*. Vol. 446. 109008.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109008>
- Magilligan F.J., Buraas E.M., Renshaw C.E. (2015) The efficacy of stream power and flow duration on geomorphic responses to catastrophic flooding. *Geomorphology*. Vol. 228. P. 175–188.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.08.016>
- Magilligan F.J., Phillips J.D., Gomez B., James L.A. (1998) Geomorphic and sedimentological controls on the effectiveness of an extreme flood. *The J. of Geology*. Vol. 106. P. 87–96.
<https://doi.org/10.1086/516009>
- Moody J.A., Martin D.A. (2009) Synthesis of sediment yields after wildland fire in different rainfall regimes in

- the western United States. *Int. J. Wildland Fire*. Vol. 18. No. 1. P. 96–115.
<https://doi.org/10.1071/WF07162>
- Neal J., Hawker L. FABDEM V1-2 [Electronic data]. Access way:
<https://doi.org/10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn>
(Access date: 15.05.2025).
- Phillips J.D., Van Dyke C. (2016) Principles of geomorphic disturbance and recovery in response to storms. *Earth Surf. Processes Landforms*. Vol. 41. P. 971–979.
<https://doi.org/10.1002/esp.3912>
- Piégay H., Chabot A., Le Lay Y.F. (2020) Some comments about resilience: From cyclicity to trajectory, a shift in living and nonliving system theory. *Geomorphology*. Vol. 367. 106527.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.018>
- Posazhennikova V.S., Golosov V.N., Kharchenko S.V. (2026) Debris flood impact on the Baksan river valley bottom induced by the Bashkara Lake outburst (the Elbrus region). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. No. 1. P. 88–101. (in Russ.)
<https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.81.1.8>
- Räpple B., Piégay H., Stella J.C., Mercier D. (2017) What drives riparian vegetation encroachment in braided river channels at patch to reach scales? Insights from annual airborne surveys (Drôme River, SE France, 2005–2011). *Ecohydrology*. Vol. 10. e1886.
<https://doi.org/10.1002/eco.1886>
- Razumov V.V. (Ed). (2005) Atlas prirodno-tekhnogennykh opasnostei Kabardino-Balkarskoi Respubliki (Atlas of natural-technogenic hazards of the Kabardino-Balkarian Republic). Moscow: Elima (Publ.). 244 p.
- Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussettini M. (2013) A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: The Morphological Quality Index (MQI). *Geomorphology*. Vol. 180. P. 96–108.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.09.009>
- Ruiz-Villanueva V., Piégay H., Scorpio V. et al. (2023) River widening in mountain and foothill areas during floods: Insights from a meta-analysis of 51 European Rivers. *Sci. Total Environ*. Vol. 903. 166103.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166103>
- Schumm S.A. (1979) Geomorphic thresholds: the concept and its applications. *Transactions of the Institute of British Geographers*. Vol. 4. No. 4. P. 485–515.
<https://doi.org/10.2307/622211>
- Scorpio V., Comiti F. (2024) Channel changes during and after extreme floods in two catchments of the Northern Apennines (Italy). *Geomorphology*. Vol. 463. 109355.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109355>
- Sidorchuk A. Yu. (2025) The formation of river longitudinal profile under the significant influence of slope processes (on the example of the Waipaoa River, New Zealand). *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 56. No. 3. P. 359–371. (in Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2949178925030014>
- Solodova A.S., Petrakov D.A., Puganov K.A. (2024) Numerical simulation of debris flow caused by Bashkara Glacier Lake outburst flood in 2017. *Ice and Snow*. Vol. 64. No. 4. P. 527–542. (in Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2076673424040043>
- Surian N., Righini M., Lucía A. et al. (2016). Channel response to extreme floods: Insights on controlling factors from six mountain rivers in northern Apennines, Italy. *Geomorphology*. Vol. 272. P. 78–91.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.002>
- Tielidze L.G., Wheate R.D. (2018) The Greater Caucasus Glacier Inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan). *The Cryosphere*. Vol. 12. P. 81–94.
<https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018>
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M. (2019) Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st century. *Int. J. of Climatology*. Vol. 39. No. 12. P. 4703–4720.
<https://doi.org/10.1002/joc.6101>
- Vinogradova N.N., Krylenko I.V., Surkov V.V. (2007) Some patterns of channel-forming activity of a mountain river in its upper reaches (case study of the Baksan River). *Geomorfologiya*. No. 2. P. 49–56. (in Russ.).
- Vinogradova O.V., Vinogradova N.N. (2013) Reaction of Mountain Rivers in the Caucasus to Climate Change. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. No. 4. P. 44–48. (in Russ.).
- Wilford D.J., Sakals M.E., Innes J.L. et al. (2004) Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*. Vol. 1. P. 61–66.
<https://doi.org/10.1007/s10346-003-0002-0>
- Zelenin E., Bachmanov D., Garipova S. et al. (2022) The database of the active faults of Eurasia (AFEAD): Ontology and design behind the continental-scale dataset. *Earth System Sci. Data Discussions*. Vol. 14. P. 4489–4503.
<https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>