

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА И ДЕГРАДАЦИИ ОЛЕДЕНЕНИЯ НА ВОДНЫЙ РЕЖИМ В ВЫСОКОГОРНОЙ ЧАСТИ БАССЕЙНА Р. ТЕРЕК

© 2024 г. Е. Д. Корнилова^{1,2*}, И. Н. Крыленко^{1,2}, Е. П. Рец², Ю. Г. Мотовилов²,
И. А. Корнева^{3,4}, Т. Н. Постникова², О. О. Рыбак^{2,4}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Россия;

²Институт водных проблем РАН, 119333, Москва, Россия;

³Институт географии РАН, 119017, Москва, Россия;

⁴Институт природно-технических систем, 299011, Севастополь, Россия

*e-mail: ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com

Поступила 20 февраля 2023 г.

После доработки 28 марта 2023 г.

Принята к печати 10 апреля 2024 г.

На основе комплекса моделей гидрометеорологического блока выполнена оценка вероятных изменений стока р. Терек в XXI веке с учётом изменений климата и оледенения в бассейне. Показано, что изменение стока составит от -2 до $+5\%$ в сценарии RCP2.6 и от -8 до $+14\%$ в сценарии RCP8.5. Направленность изменений стока в подбассейнах существенно зависит от высотного расположения зоны снегового и ледникового питания.

Ключевые слова: горная гидрология, моделирование формирования стока рек горных территорий, Северный Кавказ, Терек, изменение климата, деградация оледенения, CORDEX, GloGEMflow-debris, ЕСOMAG

DOI: 10.31857/S2076673424020014

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные изменения климата, в том числе повышение температуры воздуха, приводят к серьёзным трансформациям природной среды в горных регионах (Jones, 2011; Adler et al., 2019). Наибольшим изменениям подвержены горное оледенение (Rafiq, Mishra, 2016; Kraaijenbrink et al., 2017) и снежный покров (Marty et al., 2017; Lüthi et al., 2019), что приводит к перестройке водного режима рек (Milner et al., 2017).

Ожидаемое следствие дегляциации — увеличение речного стока за счёт усиления таяния. Однако отрицательный баланс массы ледников приводит к уменьшению объёма и площади оледенения, что в конечном итоге вызывает уменьшение общего количества талой воды. Таким образом, изменение климата и дегляциация оказывают неоднозначное влияние на высокогорные речные бассейны по всему миру (Bliss et al., 2014), потепление климата может привести либо к увеличению, либо к уменьшению речного стока в зависимости от степени отступления ледников (Pellacciotti et al., 2010). Помимо общего потепления, свой вклад в изменение стока вносит фоновое изменение осадков, что требует детальных региональных исследований в освоенных горных регионах с использованием наиболее актуальной

информации об оледенении и прогнозах его изменения на фоне изменения других климатических факторов.

В современных исследованиях в различных высокогорных бассейнах мира широко используются модели формирования стока (Hagg et al., 2010; Rahman et al., 2013; Omani et al., 2017; Singh et al., 2021). Эти модели позволяют оценить влияние климатических факторов и сокращения оледенения на речной сток (Bliss et al., 2014; Duethmann et al., 2015; Huss, Fischer, 2016). Однако для Северного Кавказа до последнего времени комплексных оценок возможных изменений стока с учётом изменения оледенения на основе методов моделирования не проводили, что и обуславливает актуальность выбора данного региона для настоящего исследования.

Площадь оледенения Кавказа в 2000—2020 гг. уменьшилась на $23.2 \pm 3.8\%$ (Tielidze et al., 2022). При этом скорость сокращения площади ледников Большого Кавказа увеличилась с 0.44% в год в период с 1960 по 1986 г. до 0.69% в год в период с 1986 по 2014 г. (Tielidze, Wheate, 2018). По результатам исследования (Носенко и др., 2013) с 2001 по 2010 г. ледники Центрального Кавказа сократились на 4.6% . Наименьшие потери площади произошли у ледников

Эльбруса, её суммарное сокращение за указанный выше период составило 2.8%. Наблюдающиеся изменения климата в регионе (Shahgedanova et al., 2009, Tashilova et al., 2019) и деградация оледенения Северного Кавказа (Kutuzov et al., 2019, Todorov et al., 2019) привели к значительным изменениям речного стока (Rets et al., 2020). Начиная с конца 1980-х — начала 1990-х годов наблюдается снижение расходов воды в июле и августе на 2—6% за 10 лет, даты прохождения максимальных расходов воды смещаются на более ранние сроки, и увеличиваются среднемесячные расходы июня (Rets et al., 2019). Все перечисленные выше тенденции — следствие трансформации внутригодового распределения стока и источников питания в меняющихся климатических условиях, что может повлиять на водообеспечение региона.

В качестве ключевого бассейна для исследования выбран бассейн р. Терек, включающий наиболее мощные очаги оледенения Центрального Кавказа. Начиная с высот более 2500 м, значительная часть территории бассейна занята многолетними снежниками, фирном и льдом. Площадь оледенения составляет около 684 км² (RGI 6.0 Consortium, 2017), из которых около 10% занимают ледники Эльбруса.

Цель работы — оценить влияние изменений климата и оледенения на речной сток в высокогорной части бассейна р. Терек на основе методов математического моделирования. В качестве базового программного комплекса для моделирования процессов формирования стока в бассейне р. Терек использовался информационно-моделирующий комплекс (ИМК) ECOMAG (ECological Model for Applied Geophysics) (Motovilov et al., 1999). Для прогностических оценок изменений стока рассматривали данные климатических сценариев RCP2.6 и RCP8.5 по результатам климатического эксперимента по региональному моделированию CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) и оценки отступления ледников для аналогичных сценариев по данным гляциологической модели GloGEMFlow-debris.

ИССЛЕДУЕМАЯ ТЕРРИТОРИЯ

Бассейн р. Терек расположен в юго-восточной части территории Северного Кавказа. Река Терек берет начало у небольшого ледника Зилга на высоте 3210 м, находящегося на северном склоне Южного Бокового хребта в районе горы Зилга-Хох. Протекает по территориям Грузии, Северной Осетии, Кабардино-Балкарии, Ставропольского края, Чечни и Дагестана. Впадает в Каспийское море, образуя дельту площадью около 5000 км². На западе бассейн р. Терек граничит с бассейном р. Кубани, на востоке — с бассейном р. Сулак, на юге граница бассейна проходит по Главному, Боковому и Южному Боковому хребтам. Высокогорная часть бассейна р. Терек включает такие крупные притоки реки, как Баксан, Чегем, Малка,

Черек и Ардон. Для учёта высокогорных притоков при моделировании был рассмотрен бассейн р. Терек до города Моздок с площадью водосбора 20600 км², из которых 34% приходится на высокогорную часть с высотами более 2000 м над уровнем моря при средней высоте бассейна 1700 м (рис. 1).

Для высокогорий зоны Большого Кавказа характерно преобладание континентального воздуха умеренных широт во все сезоны года. Согласно анализу фактических данных, годовое количество осадков в среднем по водосбору составляет 683 мм, среднегодовая температура воздуха — 6.5 °С. Сложный рельеф Северного Кавказа, состоящий из разновысотных хребтов и котловин с большим диапазоном высот, существенно влияет на радиационный режим и циркуляцию воздушных масс. Орография оказывает влияние на распределение температуры и осадков в зависимости от абсолютной высоты местности.

В бассейне Терека в географии распространения типов ландшафтов и почвенного покрова наибольшую роль играет рельеф и высотная поясность. На равнинной части бассейна распространены каштановые и светло-каштановые почвы, на высотах 300—1200 м распространены чернозёмные почвы, до 1800—2000 м — лесные почвы, выше 1800—2000 м — горно-луговые и горные лугово-степные почвы безлесных высокогорий. Основные типы растительности в пределах исследуемой территории — степная, лесостепная, лесная, субальпийская, альпийская и нивальная.

Для р. Терек характерен типичный режим стока горной реки с высоким весенне-летним половодьем, осложнённым накладывающимися пиками дождевых паводков, и низкой осенне-зимней меженью. Режимные наблюдения за расходами воды на гидрометрических постах в высокогорной части бассейна р. Терек начались преимущественно в 1950—70-х годах. В работе использовались данные по 15 постам, в настоящее время из них работает 12. Однако, учитывая особенности формирования стока в горах, освещение территории гидрометрическими данными недостаточно. Характеристики водосбора и среднегодового стока в створах данных постов приведены в табл. 1.

Для выявления современных временных трендов основных гидрологических и метеорологических характеристик использовались модифицированный параметрический критерий Стьюдента (Santer et al., 2000) и модифицированный непараметрический критерий Манна — Кендалла (Hamed, Rao, 1998). По результатам анализа фактических данных метеостанций в пределах высокогорной части бассейна р. Терек наблюдается повсеместное увеличение среднегодовой температуры воздуха со средней интенсивностью до 0.7 °С/10 лет за период 1977—2014 гг. При этом температура увеличивается главным образом в летние месяцы с интенсивностью 0.3—0.7 °С/10 лет. Статистически значимых трендов изменения годовой суммы осадков по данным метеорологических станций не выявлено (рис. 2). По

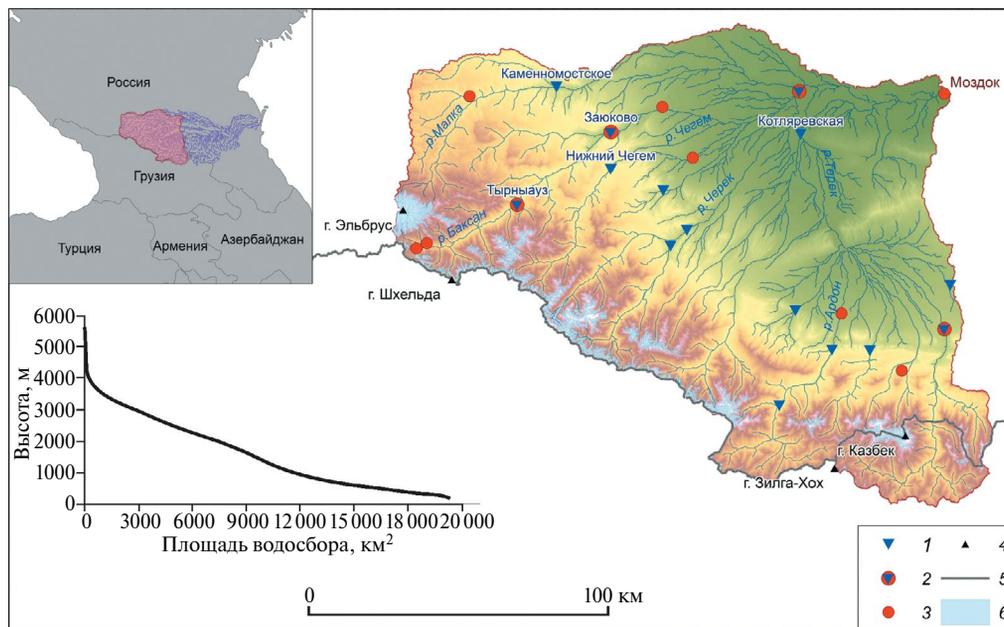


Рис. 1. Бассейн р. Терек (до замыкающего створа Моздок): 1 — гидрологические посты; 2 — гидрологические посты и метеорологические станции; 3 — метеорологические станции; 4 — горные вершины; 5 — государственная граница РФ; 6 — ледники (RGI 6.0)

Fig. 1. The Terek River basin to the Mozdok outlet: 1 — hydrological gauges; 2 — hydrological gauges and meteorological stations; 3 — meteorological stations; 4 — mountain peaks; 5 — state border of the Russian Federation; 6 — glaciers (RGI 6.0)

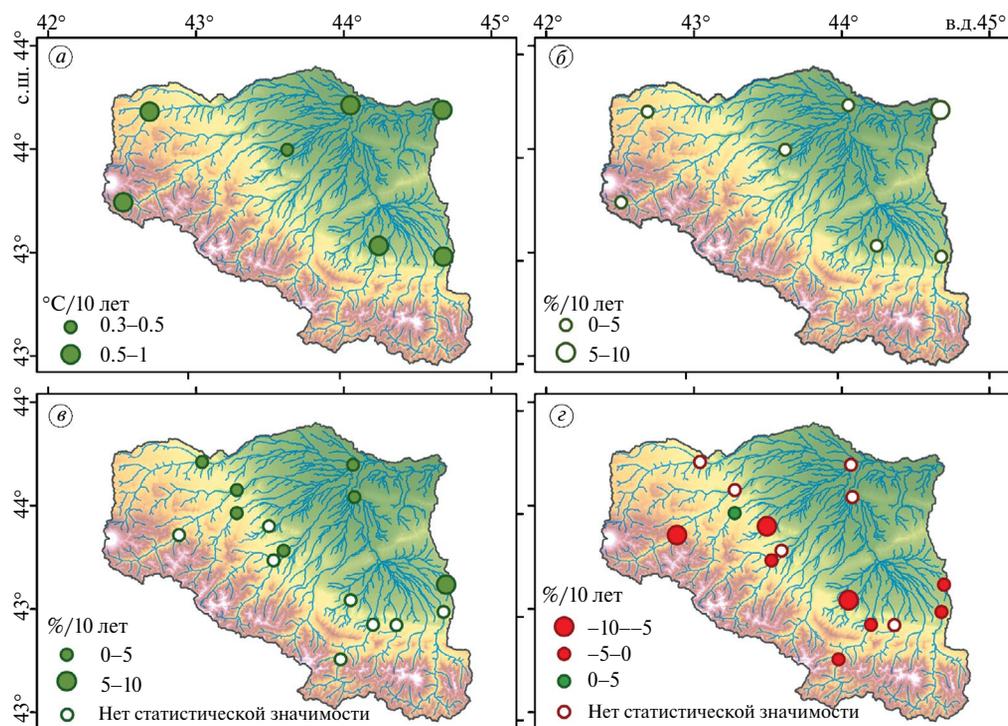


Рис. 2. Тренды изменения среднегодовой температуры (а) и годовой суммы осадков (б) по фактическим данным метеорологических станций (1977—2014 гг.), среднегодовой (в) и максимального (г) годового расходов воды по фактическим данным гидрологических постов в бассейне реки Терек (1977—2018 гг.)

Fig. 2. Trends in changes in average annual temperature (a) and annual precipitation (б) according to actual data from meteorological stations (1977—2014), average annual (в) and maximum (г) annual discharges according to actual data from hydrological gauges in the Terek River basin (1977—2018)

Таблица 1. Основные гидрографические характеристики и характеристики стока воды высокогорной части реки Терек и её притоков

Река	Пункт	Площадь водосбора, км ²	Средняя высота водосбора, м	Средний расход воды, м ³ /с	Изменение среднегодового расхода, %/10 лет	Изменение максимального расхода, %/10 лет	Ледники, %**	Период наблюдений, годы
Терек	Владикавказ	1490	2540	32.7	0.03	-2.8	3.4	1945–2018
Терек	Когляревская	8920	1800	132	0.01	-2.5	1.8	1945–2018
Ардон	Тамиск*	1080	2490	30.0	1.9	-0.5	2.1	1945–2002
Цея	Бурон	100	2820	4.0	0.2	-2.9	17.9	1951–2018
Фиалдон	Тагардон*	410	2170	7.7	1.3	-4.1	1.9	1951–2002
Камбилеевка	Ольгинское	359	1260	3.6	7.0	-4.1	–	1945–2018
Белая	Каро-Урдон	304	1360	6.1	0.09	-8.7	–	1958–2018
Малка	Каменномостское	1540	2000	14.8	2.3	-1.2	3.5	1947–2018
Малка	Прохладная	9820	1900	93.9	0.1	-2.6	3.6	1947–2018
Баксан	Заюково	2100	2360	34.6	1.2	-1.6	7.3	1945–2021
Баксан	Тырныауз	838	2990	24.7	0.1	-5.3	17.8	1971–2021
Чегем 1-й	Нижний Чегем	739	2500	14.7	3.8	1.7	7.8	1945–2018
Черек	пгт Кашхатау (Советский)*	1350	2500	42.1	3.2	-2.8	13.3	1947–2007
Черек Балкарский	Бабугент	695	2590	26.1	0.2	-1.9	15.0	1945–2018
Нальчик	Белая речка	140	1510	2.6	7.9	-10.8	–	1947–2018

Примечание.* Пост закрыт; ** по данным (RGI 6.0 Consortium, 2017)

результатам оценки временных трендов среднегодовых и максимальных расходов воды по фактическим данным на 15 постах за период наблюдений с 1970 по 2018 г. среднегодовые расходы воды за 1970—2018 гг. увеличиваются с интенсивностью 2—7%/10 лет, что может быть связано с общим увеличением годовой суммы осадков, наиболее ярко выраженным в равнинной и предгорной областях Северного Кавказа (Rets, Kireeva, 2010).

Максимальные годовые расходы, наоборот, в большинстве створов снижаются на 2—10%/10 лет, особенно это проявляется на гидрологических постах в замыкающих высокогорную часть бассейна (р. Баксан — город Тырнауз, р. Черек Балкарский — село Бабугент, р. Цея — пос. Бурон). Максимальные на Центральном Кавказе расходы воды наблюдаются, главным образом, в результате наложения паводков на волну половодья (Коровин, Галкин, 1979; Rets, Kireeva, 2010). Однако самые интенсивные паводки обычно наблюдаются в этом регионе в июле — августе (Тогоров et al., 2019). Поскольку вклад талых ледниковых вод уменьшился, в настоящее время паводки накладываются на более низкую сезонную волну половодья, что сказывается на снижении максимальных расходов.

МЕТОДЫ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Модель формирования стока. Математическое моделирование процессов формирования стока выполнено на основе информационно-моделирующего комплекса (ИМК) ЕСОМАГ (Motovilov, 1999). ЕСОМАГ — модель с распределёнными параметрами, где поверхность бассейна разделяется на отдельные ландшафтные элементы — элементарные водосборы. Модель описывает основные процессы гидрологического цикла суши: инфильтрацию, испарение, термический и водный режим почв, формирование снежного покрова и снеготаяние, формирование поверхностного, внутрипочвенного, грунтового и речного стока.

Исходными метеорологическими данными для расчётов по модели формирования стока служат среднесуточные данные о температуре воздуха, осадках и при наличии — о дефиците влажности воздуха. Для адаптации модели к определённому бассейну необходима информация о подстилающей поверхности, включая рельеф, почвенные и ландшафтные карты, оледенение (табл. 2).

Климатические данные. Данные мезомасштабного климатического моделирования получены на

Таблица 2. Исходные данные для модели ЕСОМАГ в бассейне р. Терек

Тип данных	Период/Дата публикации данных	Разрешение/Масштаб	Ресурс
<i>Физическо-географические характеристики бассейна</i>			
Цифровая модель рельефа SRTM	2000	90 м · 90 м	Consultative Group for International Agriculture Research Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI: http://srtm.csi.cgiar.org/)
Ландшафтное районирование	1990 (республика Северная Осетия), 1997 (Кабардино-Балкарская республика)	1:750 000	Атлас Кабардино-Балкарской республики и республики Северная Осетия
Почвенный покров	1990 (республика Северная Осетия), 1997 (Кабардино-Балкарская республика)	1:750 000	Атлас Кабардино-Балкарской республики и республики Северная Осетия
Площадь оледенения	2001—2003 гг.	10 м · 10 м	RGI 6.0 (RGI Consortium, 2017)
<i>Гидрометеорологические и гляциологические данные</i>			
Расходы воды	1977—2018	1 сутки	Гидрологический ежегодник
Приземная температура воздуха, суммы осадков	1977—2005 (исторические данные) 2006—2099 (прогностические данные климатических сценариев RCP2.6 и RCP8.5)	1 сутки	Проект CORDEX (Корнева, Рыбак, 2020)

основе данных проекта CORDEX. Особенность подхода, реализованная в проекте, заключается в том, что в связке работают глобальные климатические модели, на которых рассчитываются глобальные климатические поля с малым пространственным разрешением (от 1 до 5° по горизонтали в зависимости от вида и реализации модели), которые задают граничные условия региональным (мезомасштабным) климатическим моделям, работающим уже на гораздо более детальном пространственном разрешении (11—50 км). В работе использовались результаты расчётов для региона Центральной Азии, который включает в себя Кавказский регион. Для всех полей была проведена коррекция и регионализация исходных данных моделирования CORDEX с помощью стационарных метеорологических данных по 22 метеорологическим станциям для Центрального Кавказа и соседних территорий, включающих бассейн реки Терек, а также отдельно для района Эльбруса. Регионализация данных заключалась в их перемасштабировании из модельной сетки разрешением 25 км в пространственную сетку с разрешением около 1 км с использованием значений вертикальных градиентов температуры воздуха и количества осадков (Корнева, Рыбак, 2024).

Гляциологические модели. Данные об изменении площади оледенения в пределах водосбора получены на основе модифицированной версии модели GloGEMFlow (Zekollari et al., 2019), получившей благодаря включению блока для расчёта моренного покрова название GloGEMflow-debris (Postnikova et al., 2023). В модели используется уравнение неразрывности для моделирования движения и эволюции ледника вдоль осевой линии, существенными компонентами для учёта эволюции моренного покрова в модели являются: поступление моренного материала на ледник, динамическое перераспределение

(перенос) моренного покрова, вытаивание в области абляции и вынос в прифронтальную зону.

Схема усвоения моделью ECOMAG данных из климатической и гляциологической модели. Блок-схема усвоения данных климатического и гляциологического моделирования моделью формирования стока ECOMAG представлена на рис. 3.

Согласно данной схеме в качестве входных данных в модели ECOMAG использованы сеточные данные о приземной температуре и сумме атмосферных осадков суточного разрешения с пространственным разрешением данных 1×1 км. Исторический период включает суточные данные об осадках и температуре воздуха за 1977—2005 гг., прогностический — аналогичные данные за 2006—2099 гг.

При подключении ледникового блока к модели ECOMAG задавалась доля оледенения каждого элементарного водосбора в соответствии с результатами численных экспериментов на модели GloGEMflow-debris с временным шагом раз в 10 модельных лет.

При моделировании с учётом оледенения в модели ECOMAG были учтены различия коэффициентов таяния льда и снега. Также по данным гляциологического моделирования был учтён коэффициент редукции таяния k_{debris} (Vacco et al., 2010; Verhaegen et al., 2020; Postnikova et al., 2023) в зависимости от толщины моренного чехла h_{debris} :

$$k_{debris} = \exp\left(\frac{-h_{debris}}{1.15}\right).$$

Для итогового расчёта степени влияния моренного чехла на скорость таяния рассчитывался коэффициент редукции таяния k_{debris} , который затем умножали на коэффициент таяния чистого льда и на степень покрытости мореной ледника в элементарном

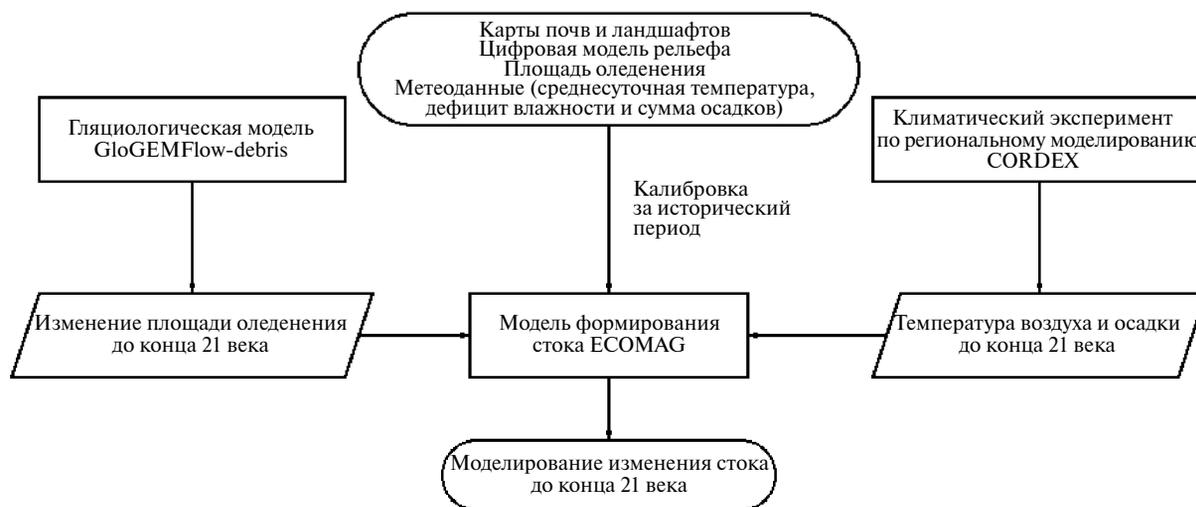


Рис. 3. Схема усвоения данных климатического и гляциологического моделирования моделью ECOMAG
 Fig. 3. The scheme of assimilation of data from climatic and glaciological modeling by the ECOMAG model

водосборе (%). После вычислялся средневзвешенный коэффициент таяния (между замороженным и чистым льдом) и вводился в модель формирования стока каждые 10 модельных лет. Таким образом, учитывалось не только уменьшение площади оледенения, но и эффект уменьшения таяния вследствие изолирующего эффекта моренного чехла.

Таблица 3. Критерии качества моделирования при расчётах по данным климатического моделирования проекта CORDEX за исторический период 1977–2005 гг.

Гидрологический пост	Критерии качества моделирования		
	сутки	месяц	год
	NSE*	R ^{2**}	BIAS***
р. Баксан – г. Тырнауз	0.62	0.77	–13.0
р. Баксан – с. Заюково	0.57	0.72	7.8
р. Чегем – с. Нижний Чегем	0.35	0.50	10.9
р. Терек – ст. Котляревская	0.5	0.76	7.0
р. Малка – с. Каменноостское	0.45	0.74	–2.5

Примечание. *Критерий эффективности моделирования Нэша – Саттклифа; **коэффициент детерминации между фактическими и смоделированными объёмами стока; ***систематическая ошибка оценки объёмов стока (%).

Для калибровки и валидации модели ECOMAG использовались суточные данные гидрологических постов: р. Баксан – Тырнауз, р. Баксан – Заюково, р. Чегем – Нижний Чегем, р. Малка – Каменноостское, р. Терек – Котляревская; калибровка параметров модели формирования стока проводилась по данным за период 1995–2005 гг., валидация за весь исторический период 1977–2005 гг. (табл. 3). Сток части гидрологических постов, расположенных в пределах исследуемого бассейна, зарегулирован, либо их данные содержат существенные пропуски и погрешности, связанные с хозяйственной деятельностью на водосборе и погрешностями измерений, поэтому эти данные не использовались при калибровке модели. Для оценки качества моделирования использовались общепринятые в гидрологических расчётах критерии (Мотовилов, Гельфан, 2018), такие как систематическая ошибка оценки объёмов стока (BIAS, %), критерий эффективности моделирования Нэша – Саттклифа (NSE), коэффициент детерминации между

фактическими и смоделированными месячными объёмами стока. В практике моделирования принято, что результаты моделирования считаются хорошими при $NSE > 0.80$, удовлетворительными при $0.80 > NSE > 0.36$ и неудовлетворительными при $NSE < 0.36$. Относительная ошибка в оценках объёмов стока для многолетнего периода не должна превышать 10–15% (Борщ и др., 2023). Стоит отметить, что климатические модели воспроизводят лишь одну из возможных реализаций климата за исторический период, а не хронологический ход метеорологических характеристик (Gelfan et al., 2015), поэтому оценки по критериям NSE и R² позволяют оценить лишь общее сходство гидрографов за среднемноголетний период. По результатам валидации модель ECOMAG, согласно вышеуказанным критериям, удовлетворительно воспроизводит как гидрографы, так и годовые объёмы стока при расчётах по данным климатического моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки возможного диапазона изменений стока высокогорной части бассейна р. Терек рассматривались два климатических сценария (RCP): RCP2.6 («мягкий») и RCP8.5 («жёсткий»). Для анализа вычислялись аномалии гидрометеорологических характеристик, осреднённых за прогностические периоды 2006–2039, 2040–2069, 2070–2099 гг. относительно аналогичных, смоделированных за базовый исторический период 1977–2005 гг.

Приземная температура воздуха. По данным климатического моделирования CORDEX ожидается, что при сценарии RCP8.5 среднегодовые температуры воздуха на территории бассейна р. Терек повысятся на 2 °C к середине 21 века (2040–2069 гг.) и на 4 °C к концу XXI века (2070–2099 гг.). В сценарии RCP2.6 средняя температура воздуха повысится на 0.8–1.2 °C в течение 2040–2069 гг. и на 1–1.2 °C в течение 2070–2099 гг. (рис. 4, а). Также стоит отметить, что в «мягком» сценарии ко второй половине XXI века климатический фон в регионе стабилизируется, в отличие от «жёсткого» сценария.

При анализе внутригодового хода осреднённой по бассейну р. Терек температуры воздуха было выявлено, что в 2070–2099 гг. в летние месяцы увеличение температуры по сравнению с историческим периодом 1977–2006 гг. достигнет 2–3 и 6–7 °C согласно сценариям RCP2.6 и RCP8.5 соответственно (рис. 5, а). При этом аномалии температуры воздуха в зимние месяцы меньше и иногда достигают отрицательных значений. В сценарии RCP2.6 аномалии зимних температур воздуха составляют в среднем –1 °C за период 2006–2039 гг. и –0.5 °C за 2040–2069 и 2070–2099 гг. Однако в сценарии RCP8.5 по состоянию на конец столетия аномалии температуры воздуха за зимние месяцы будут положительными и составят 1–2 °C.

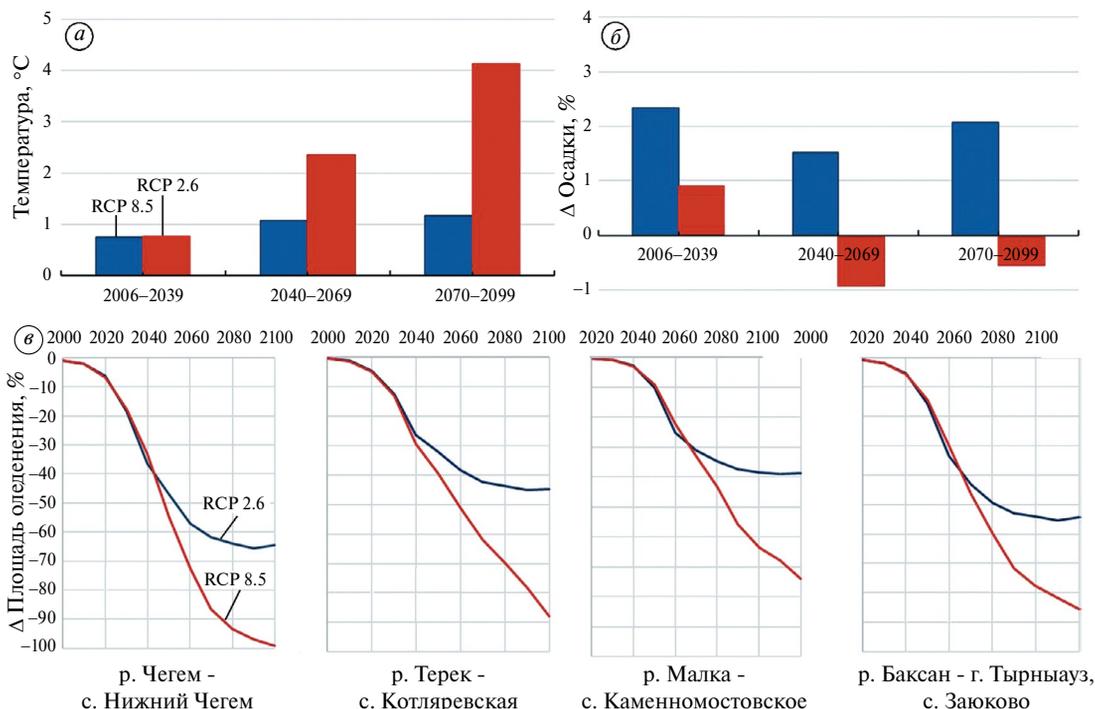


Рис. 4. Прогнозируемое изменение среднегодовой температуры воздуха (а), годовой суммы осадков (б) и площади оледенения (в) для бассейнов рек до различных замыкающих створов на территории бассейна р. Терек для двух сценариев (RCP2.6 и RCP8.5)
Fig. 4. Predicted changes in the average annual air temperature (a), annual precipitation (b) and glaciation area (c) for river basins to various outlets in the Terek River basin for two (RCP2.6 and RCP8.5)

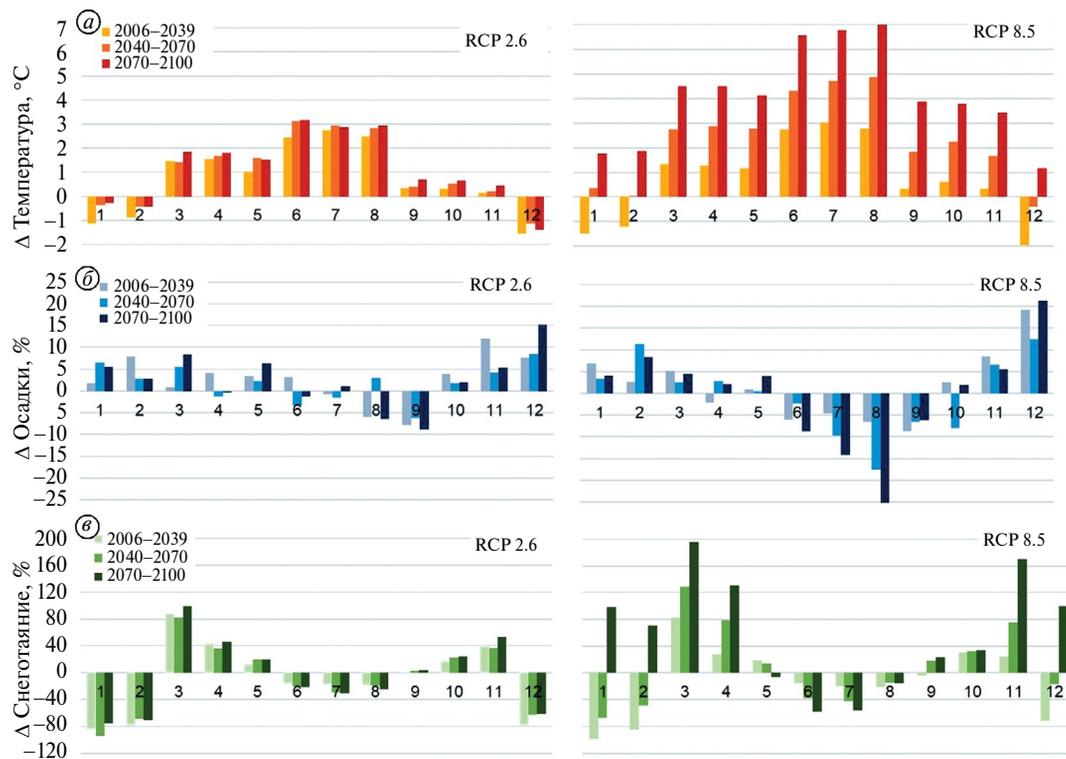


Рис. 5. Прогнозируемые аномалии среднемесячных температур воздуха (а), сумм осадков (б) и снеготаяния (в) на территории бассейна р. Терек для двух различных сценариев (RCP2.6 и RCP8.5) в пределах исследуемого водосбора
Fig. 5. Predicted anomalies of average monthly air temperatures (a), precipitation (b) and snowmelt (c) in the Terek River basin for two different scenarios (RCP2.6 and RCP8.5) within the studied catchment area

Оледенение. Согласно результатам гляциологического моделирования (Postnikova et al., 2023), до 2040 г. площадь оледенения в пределах бассейна р. Терек будет снижаться с одинаковой интенсивностью в обоих климатических сценариях и уменьшится на 30% по сравнению с оледенением по состоянию на 1990 г. Данные темпы несколько ниже, чем скорость деградации оледенения всего Кавказа, так как именно в пределах рассматриваемого бассейна расположены наиболее высокогорные ледники на вершинах — Эльбрус и Казбек. В сценарии RCP2.6 площадь оледенения к 2080 г. уменьшится на 55% и далее останется стабильной до конца XXI века. При этом в сценарии RCP8.5 площадь оледенения будет снижаться вплоть до конца столетия и уменьшится суммарно в бассейне р. Терек на 90%. Однако ледники в пределах исследуемого бассейна имеют разное морфологическое строение, высотное расположение и массу, поэтому и их трансформация в условиях меняющегося климата будет неодинаковой. Так, в пределах водосбора р. Малки, которая питается преимущественно стоком с ледников, расположенных на северных и северо-восточных склонах Эльбруса, площадь оледенения в сценарии RCP8.5 сократится к концу столетия на 75%, в то время как в пределах водосбора р. Чегем, питающейся талой водой с ледников, расположенных на северном склоне Большого Кавказского хребта, площадь оледенения, согласно модельным оценкам, может снизиться практически на 100%. Соответственно, изменение площади оледенения будет отличаться для конкретных водосборов (см. рис. 4, в).

Осадки. В обоих сценариях ожидается увеличение годовой суммы осадков до середины XXI века — до 2% для «мягкого» и до 1% для «жесткого» сценария. Затем в сценарии RCP8.5 ожидается незначительное снижение сумм осадков (на 1% относительно исторического периода), которое прослеживается вплоть до конца столетия (см. рис. 4, б). В сценарии RCP2.6 ожидаются положительные аномалии годовой суммы осадков до конца XXI века.

Ожидается увеличение количества осадков зимой с октября по март и, наоборот, значительное уменьшение в остальной период. Наибольший рост осадков ожидается в декабре — в период 2070—2099 гг. он составит 15 и 23% в сценариях RCP2.6 и RCP8.5 соответственно, что на фоне отрицательных аномалий температур в зимние месяцы (см. рис. 5, а–б) способствует снижению снеготаяния (см. рис. 5, в) и аккумуляции снега. Особенно интенсивное накопление снега будет наблюдаться на высотах более 2000 м. В январе и феврале увеличение количества осадков будет не столь значительным и составит 5—10% для обоих сценариев. В летние месяцы ожидается снижение количества осадков, особенно в «жестком» сценарии в 2070—2099 гг., и составит от 8% в июне до 25% в августе.

Снеготаяние. По результатам моделирования на фоне отрицательных аномалий температур воздуха ожидается уменьшение снеготаяния в период с декабря по февраль (см. рис. 5, в). Снеготаяние в весенний период увеличивается из-за более раннего наступления положительных температур воздуха и их положительных аномалий по сравнению с историческим периодом. В летние месяцы (с июня по август) прогнозируется уменьшение снеготаяния относительно исторического периода, что обусловлено таянием основной массы снега в весенний период. За счёт увеличения температуры воздуха в более ранние сроки накопившийся за зиму снежный покров успеет растаять до наступления лета, что, как будет рассмотрено ниже, приведёт к перестройке гидрографов. Стоит отметить, что при реализации «жесткого» сценария возможно значительное увеличение снеготаяния, особенно в конце XXI века, что сильно повлияет на внутригодовой ход стока. В период 2070—2099 гг. снеготаяние при максимальном росте в марте до 100 и 200% далее снизится в летние месяцы на 20—30 и 50—60% в сценариях RCP2.6 и RCP8.5 соответственно. В осенний период снеготаяние возрастает в связи с тем, что увеличивается период положительных температур, и снег продолжает таять выше современной климатической снеговой границы, наибольшие положительные аномалии превышают 150% в ноябре в сценарии RCP8.5 в 2070—2099 гг.

Речной сток, годовые объёмы стока. В результате моделирования формирования стока с учётом изменения климата и оледенения в XXI в. установлено, что при сочетании указанных факторов возможно как снижение, так и увеличение объёма стока в разных частях бассейна р. Терек в зависимости от степени и темпов деградации оледенения, расположения зоны снегового питания и сочетания климатических факторов (рис. 6, а).

В сценарии RCP2.6 изменения стока не столь значительны, как в сценарии RCP8.5. Во всех створах ожидается увеличение объёма стока в период 2006—2039 гг. на 1—4%, затем снижение в период 2040—2069 гг. и его стабилизация в последней трети XXI века, что коррелирует со стабилизацией температуры и площади оледенения. Стоит отметить, что в 2070—2099 гг. продолжит незначительно расти сток в створах р. Малки — Каменноостское и р. Терек — Котляревская, которые в том числе питаются за счёт таяния ледников и вечных снегов Эльбруса и Казбека. В створе р. Баксан — Заюково, в отличие от расположенного выше по течению створа у Тырныауза, сток незначительно увеличится, что обусловлено большей долей дождевого питания и, соответственно, большим влиянием увеличения осадков.

В бассейнах р. Баксан и р. Малки, в которых значительная часть ледникового и снегового стока поступает со склонов Эльбруса, в сценарии RCP8.5 изменения объёма стока значительно больше, чем в сценарии RCP2.6. Изменения имеют положительную

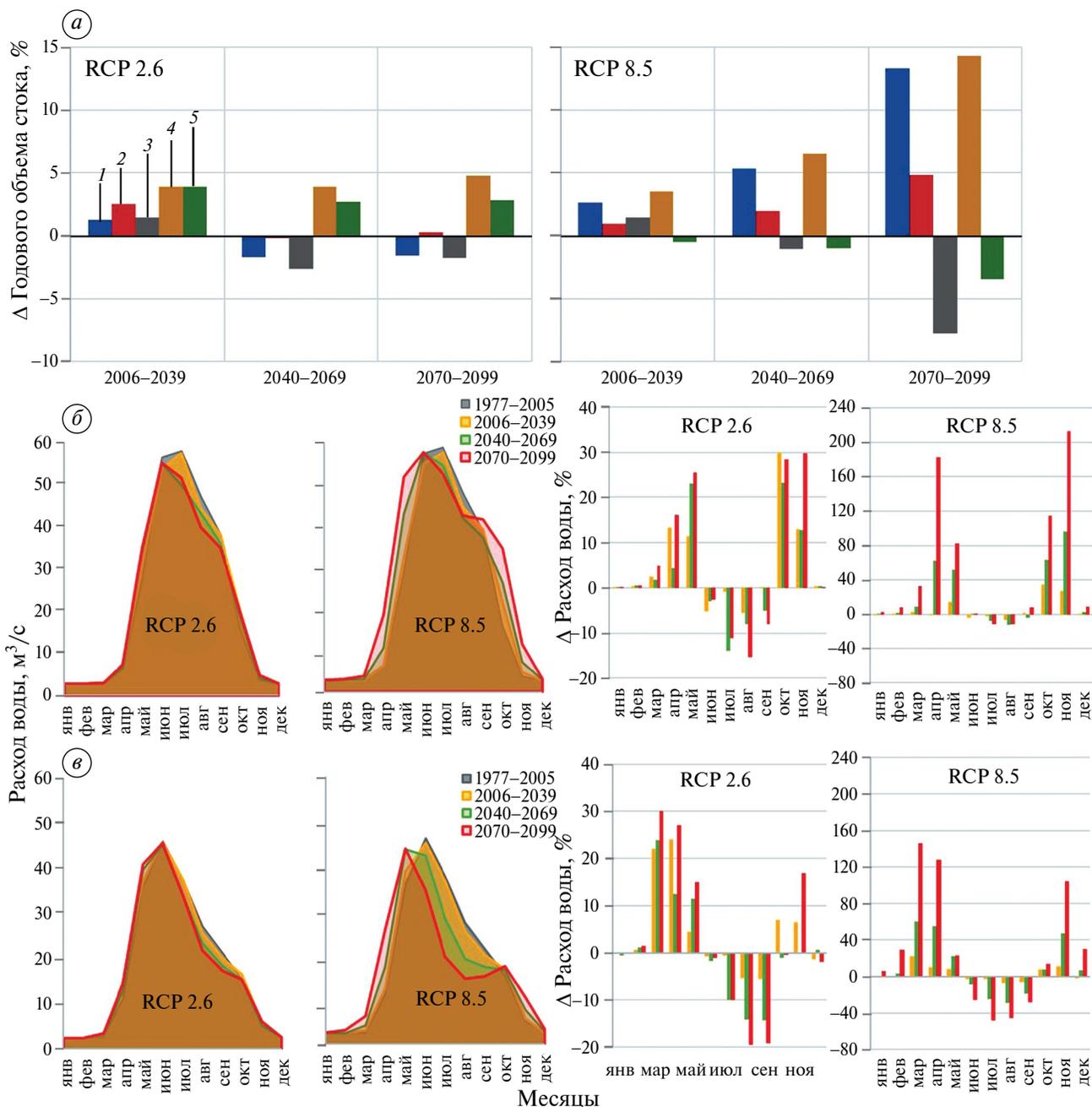


Рис. 6. Аномалии годового объёма стока относительно базового исторического периода (а: 1 – Баксан – Тырныауз; 2 – Баксан – Заюково; 3 – Чегем – Нижний Чегем; 4 – Малка – Каменномостское; 5 – Терек – Котляревская), трансформация внутригодового распределения стока и его аномалии в створе р. Баксан у Тырныауза (б) и р. Чегем у Нижнего Чегема (в) в сценариях RCP2.6 и RCP8.5

Fig. 6. Anomalies of the average monthly discharges relative to the base historical period (а: 1 – Baksan–Tyrynyauz; 2 – Baksan–Zayukovo; 3 – Chegem–Nizhny Chegem; 4 – Malka–Kamennomostskoye; 5 – Terek–Kotlyarevskaya), transformation of the intra-annual flow distribution and its anomalies in the Baksan River – Tyrynyauz (б) and the Chegem River – Nizhny Chegem (в) in scenarios RCP2.6 and RCP8.5

направленность, что связано с увеличением водоотдачи из снежного покрова до конца XXI века. Наибольшее увеличение стока в сценарии RCP8.5 к концу XXI века ожидается в створах р. Малки — у Каменномостского (14%) и р. Баксан — у Тырныауза

(13%). Изменение объёма стока вниз по течению реки будет зависеть от доли снегового и ледникового питания в суммарном стоке. Так, на расположенном ниже по течению створе р. Баксан у Заюкова в сценарии RCP8.5 оно составит 5%. В створе р. Терек

у Котляревской, замыкающем осетинскую часть бассейна р. Терек, в сценарии RCP8.5 возможно незначительное снижение объёма стока в течение всего прогнозного периода, которое к концу века не превысит 4%.

На примере р. Чегем видно, что направленность изменений стока в конкретных створах существенно зависит от высотного расположения бассейна, определяющего интенсивность деградации ледников и таяния вечных снегов, а в наиболее выраженном случае в сценарии RCP8.5 от того, сохранится ли оледенение или полностью исчезнет. Так, в сценарии RCP8.5 объём стока р. Чегем будет расти до середины века на величину до 5%, а далее начинает значительно снижаться, а в последней трети XXI века снизится на 8%. Увеличение объёма стока рек Малки и Баксана будет продолжаться вплоть до конца столетия. Однако увеличение объёмов стока будет главным образом связано с таянием вечных снегов, расположенных в пределах Эльбруса, при этом вклад ледникового стока будет уменьшаться.

Внутригодовое распределение стока. В сценарии RCP2.6 на всех исследуемых створах ожидается трансформация гидрографа со сдвигом начала половодья на более ранние сроки и снижение расхода воды в июне, июле и августе, что соответствует современным тенденциям (см. рис. 6, б–в). Для большинства створов также ожидается снижение максимального среднемесячного расхода. Исключение составляет створ р. Малки у Каменноостского, где ожидается последовательное увеличение максимума расхода воды вплоть до последней трети XXI века, что объясняется расположением зоны питания на склонах Эльбруса и меньшей степенью деградации оледенения в пределах водосбора. На фоне увеличения количества осадков в зимний период снежный покров в пределах Эльбруса будет также расти, что вызовет увеличение доли снегового питания.

В сценарии RCP8.5 ожидаются более выраженные изменения внутригодового распределения стока. Тенденция «рапластывания» гидрографа проявляется более отчётливо, чем в сценарии RCP2.6. К последней трети XXI века ожидается сдвиг начала половодья на март, смещение максимальных расходов воды на май — июнь, снижение расходов в летний период. Также ожидается увеличение расхода воды в осенний период, что обусловлено таянием свежеснегов, продолжающимся таянием вечных снегов и увеличением жидких осадков. Увеличение осадков в осенний период приведёт к росту паводкового стока.

Наибольшие относительные изменения месячных объёмов стока ожидаются в конце столетия при сценарии RCP8.5 в весенние и в осенние периоды, что соответствует максимальным изменениям количества осадков, температуры воздуха и объёма снеготаяния. Например, увеличение среднемесячных расходов воды составит 80—210% в апреле — мае и октябре — ноябре в створе р. Баксан у Тырныуза (см. рис. 6,

б) и 90—150% в марте — апреле и ноябре в створе р. Чегем у Нижнего Чегема (см. рис. 6, в). В то же время сток в летний период в среднем уменьшится на 5—15% в высокогорных створах р. Баксан и р. Малки и до 40% в створах р. Чегем у Нижнего Чегема и р. Терек у Котляревской. В бассейнах этих рек ожидается наибольшее сокращение площади оледенения, что станет причиной наибольших изменений летнего стока в сценарии RCP8.5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование модели формирования стока в комплексе с гляциологической моделью и прогностическими данными климатического моделирования позволило оценить возможные изменения характеристик речного стока и водного режима на фоне меняющегося климата и деградации горного оледенения. Рассмотренные климатические сценарии RCP2.6 («мягкий») и 8.5 («жёсткий») не исчерпывают все реализации будущего климата, однако позволяют оценить возможный диапазон изменений стока и механизмы его реакции на меняющиеся климатические условия.

По результатам расчётов установлено, что при сочетании ряда факторов возможно как снижение, так и увеличение объёмов стока р. Терек. Изменение объёма стока в конкретных створах будет зависеть от доли и особенностей области ледникового и снегового питания и составит от –2 до +5% в сценарии RCP2.6 и от –8 до +14% — в сценарии RCP8.5. Направленность изменений стока в конкретных створах будет существенно зависеть от высотного расположения зоны снегового и ледникового питания, определяющего интенсивность их деградации. Так, в сценарии RCP8.5 сток р. Чегем начнёт значительно снижаться во второй половине XXI века. При этом увеличение объёмов стока рек Малки и Баксана, которые преимущественно питаются тальми водами ледников и вечных снегов Эльбруса, будет продолжаться вплоть до конца столетия. Однако это увеличение будет определяться главным образом ростом доли снегового питания в результате увеличения количества осадков в зимний период.

Модельные оценки подтверждают современные тенденции в изменениях внутригодового распределения стока — сдвиг начала половодья на более ранние сроки, уменьшение объёмов стока в летний период и их увеличение в осенние месяцы. Подобные изменения могут привести к нехватке водных ресурсов в летние месяцы и к возрастанию опасности затопления территорий в осенний период, однако в целом острого дефицита водных ресурсов на фоне ожидаемого роста осадков в XXI веке в высокогорной части бассейна р. Терек не ожидается.

Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность использования предложенного комплекса моделей для оценки изменения стока

высокогорных территорий, в дальнейшем разработанный подход может применяться для планирования мероприятий по управлению водными ресурсами на Северном Кавказе.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем РАН, темы FMWZ-2022-0001 (1.6-адаптация модели ECOMAG, 1.12-моделирование), темы № FMWZ-2022-0003 (3.1-совершенствование модели), по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши, раздел I.10 (ЦИТИС 121051400038-1-сбор и анализ фактических данных о бассейне р. Терек) и НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н. И. Макавеева географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова (ЦИТИС 121051200166-4-анализ расчётных гидрографов).

Acknowledgments. The study was carried out under the Governmental Order to the Water Problems Institute of RAS, subject FMWZ-2022-0001 (1.6-adaptation of the ECOMAG model, 1.12-calculation); subject FMWZ-2022-0003 (3.1-model improvement); under the state assignment of the Hydrology department (CITIS121051400038-1-collection and analysis of factual data on the Terek river basin) and the Research laboratory of soil erosion and fluvial processes, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (CITIS121051200166-4-analysis of hydrographs).

ЛИТЕРАТУРА

- Борщ С. В., Симонов Ю. А., Христофоров А. В.* Прогнозирование стока рек России. М.: Гидрометцентр России, 2023. 200 с.
- Корнева И. А., Рыбак О. О.* Проекция климата на Кавказе (результаты эксперимента CORDEX) // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 4. С. 5—12. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2020-4-5-12>
- Корнева И. А., Рыбак О. О., Рыбак Е. А.* Коррекция модельных климатических данных для моделирования горных ледников Центрального Кавказа // Системы контроля окружающей среды. 2024. № 1 (в печати).
- Коровин В. И., Галкин Г. А.* Генетическая структура наводнений и паводков на реках Северо-Западного Кавказа за 275-летний период // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1979. № 3. С. 90—94.
- Мотовилов Ю. Г., Гельфан А. Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во РАН, 2018. 300 с. <https://doi.org/10.31857/S9785907036222000001>
- Носенко Г. А., Хромова Т. Е., Ротомаяева О. В., Шахгеданова М. В.* Реакция ледников Центрального Кавказа в 2001—2010 гг. на изменения температуры и количества осадков // Лёд и Снег. 2013. Т. 53. № 1. С. 26—33. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-1-26-33>
- Adler C., Huggel C., Orlove B., Nolin A.* Climate change in the mountain cryosphere: impacts and responses // *Regional Environmental Change*. 2019. V. 19. P. 1225—1228. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01507-6>
- Bliss A., Hock R., Radić V.* Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change // *Journ. of Geophys. Research: Earth Surface*. 2014. V. 119. № 4. P. 717—730. <https://doi.org/10.1002/2013JF002931>
- Duethmann D., Bolch T., Farinotti D., Kriegel D., Vorogushyn S., Merz B., Pieczonka T., Jiang T., Su B., Güntner A.* Attribution of streamflow trends in snow and glacier melt-dominated catchments of the Tarim River, Central Asia // *Water Resources Research*. 2015. V. 51 (6). P. 4727—4750. <https://doi.org/10.1002/2014WR016716>
- Gelfan A., Semenov V. A., Gusev E., Motovilov Y., Nasonova O., Krylenko I., Kovalev E.* Large-basin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by internal atmospheric variability // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2015. V. 19. № 6. P. 2737—2754. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2737-2015>
- Hagg W., Shahgedanova M., Mayer C., Lambrecht A., Popovnin V.* A sensitivity study for water availability in the Northern Caucasus based on climate projections // *Global and Planetary Change*. 2010. V. 73 (3—4). P. 161—171. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.05.005>
- Hamed K. H., Rao A. R.* A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data // *Journ. of hydrology*. 1998. V. 204. № 1—4. P. 182—196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Huss M., Fischer M.* Sensitivity of very small glaciers in the Swiss Alps to future climate change // *Frontiers in Earth Science*. 2016. V. 4. P. 34. <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00034>
- Jones J. A.* Hydrologic responses to climate change: considering geographic context and alternative hypotheses // *Hydrological Processes*. 2011. V. 25. № 12. P. 1996—2000. <https://doi.org/10.1002/hyp.8004>
- Kraaijenbrink P. D. A., Bierkens M. F. P., Lutz A. F., Immerzeel W. W.* Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers // *Nature*. 2017. V. 549. P. 257—260. <https://doi.org/10.1038/nature23878>
- Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrikov D.* Volume changes of Elbrus glaciers from 1997 to 2017 // *Frontiers in Earth Science*. 2019. V. 7. P. 153. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00153>
- Lüthi S., Ban N., Kottlarski S., Steger C. R., Jonas T., Schär C.* Projections of alpine snow-cover in a high-resolution climate simulation // *Atmosphere*. 2019. V. 10. № 8. P. 463. <https://doi.org/10.3390/atmos10080463>
- Marty C., Schlägl S., Bavay M., Lehning M.* How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps // *The Cryosphere*. 2017. V. 11. № 1. P. 517—529. <https://doi.org/10.5194/tc-11-517-2017>
- Milner A. M., Khamis K., Battin T. J., Brittain J. E., Barrand N. E., Füreder L., Cauvy-Fraunié S., Gíslason G. M., Jacobsen D., Hannah D. M., Hodson A. J., Hood E., Lencioni V., Ólafsson J. S., Robinson C. T., Tranter M., Brown L. E.* Glacier shrinkage driving global changes

- in downstream systems // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2017. V. 114. № 37. P. 9770—9778. [https://doi.org/ 10.1073/pnas.1619807114](https://doi.org/10.1073/pnas.1619807114)
- Motovilov Yu., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A.* ECOMAG — regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region // Department of Geophysics, University of Oslo. 1999. 88 p.
- Omani N., Srinivasan R., Karthikeyan R., Smith P.* Hydrological modeling of highly glacierized basins (Andes, Alps, and Central Asia) // *Water*. 2017. V. 9 (2). P. 111. [https://doi.org/ 10.3390/w9020111](https://doi.org/10.3390/w9020111)
- Pellicciotti F., Bauder A., Parola M.* Effect of glaciers on streamflow trends in the Swiss Alps // *Water Resources Research*. 2010. V. 46. № 10. P. 1—16. [https://doi.org/ 10.1029/2009WR009039](https://doi.org/10.1029/2009WR009039)
- Postnikova T., Rybak O., Gubanov A., Zekollari H., Huss M., Shahgedanova M.* Debris cover effect on the evolution of Northern Caucasus glaciers in the 21st century // *Frontiers in Earth Science*. 2023. V. 11. № 1. P. 1—22. [https://doi.org/ 10.3389/feart.2023.1256696](https://doi.org/10.3389/feart.2023.1256696)
- Rafiq M., Mishra A.* Investigating changes in Himalayan glacier in warming environment: a case study of Kolahoi glacier // *Environmental Earth Sciences*. 2016. V. 75. P. 1—9. [https://doi.org/ 10.1007/s12665-016-6282-1](https://doi.org/10.1007/s12665-016-6282-1)
- Rahman K., Maringanti C., Beniston M., Widmer F., Abbaspour K., Lehmann A.* Streamflow modeling in a highly managed mountainous glacier watershed using SWAT: the Upper Rhone River watershed case in Switzerland // *Water resources management*. 2013. V. 27 (2). P. 323—339. [https://doi.org/ 10.1007/s11269-012-0188-9](https://doi.org/10.1007/s11269-012-0188-9)
- Rets E. P., Durmanov I. N., Kireeva M. B.* Peak runoff in the north Caucasus: Recent trends in magnitude, variation and timing. // *Water Resources*. 2019. V. 46 (1). P. 56—66. [https://doi.org/ 10.1134/S0097807819070157](https://doi.org/10.1134/S0097807819070157)
- Rets E. P., Durmanov I. N., Kireeva M. B., Smirnov A. M., Popovnin V. V.* Past ‘peak water’ in the North Caucasus: Deglaciation drives a reduction in glacial runoff impacting summer river runoff and peak discharges // *Climatic Change*. 2020. V. 163 (4). P. 2135—2151. [https://doi.org/ 10.1007/s10584-020-02931-y](https://doi.org/10.1007/s10584-020-02931-y)
- Rets E., Kireeva M.* Hazardous hydrological processes in mountainous areas under the impact of recent climate change: case study of Terek River basin // *IAHS Publ*. 2010. V. 340. P. 126—134.
- RGI 6.0 Consortium, 2017. Randolph Glacier Inventory — A Dataset of Global Glacier Outlines, Version 6.0. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. Электронный ресурс. <https://nsidc.org/data/nsidc-0770/versions/6> Дата обращения: 26.02.2023. <https://doi.org/10.7265/4M1F-GD79>
- Santer B. D., Wigley T. M. L., Boyle J. S., Gaffen D. J., Hnilo J. J., Nychka D., Parker D. E., Taylor K. E.* Statistical significance of trends and trend differences // *Journ. of Geophys. Research*. 2000. V. 105. № 6. P. 7337—7356. [https://doi.org/ 10.1029/1999JD901105](https://doi.org/10.1029/1999JD901105)
- Shahgedanova M., Hagg W., Zacios M., Popovnin V.* An Assessment of the recent past and future climate change, glacier retreat, and runoff in the caucasus region using dynamical and statistical downscaling and HBV-ETH hydrological model. // *Regional Aspects of Climate-Terrestrial-Hydrologic Interactions in Non-boreal Eastern Europe*. 2009. P. 63—72. [https://doi.org/ 10.1007/978-90-481-2283-7_8](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2283-7_8)
- Singh V., Jain S. K., Shukla S. K.* Glacier change and glacier runoff variation in the Himalayan Baspa River basin // *Journ. of Hydrology*. 2021. V. 593. P. 125918. [https://doi.org/ 10.1016/j.jhydrol.2020.125918](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125918)
- Tashilova A., Ashabokov B., Kesheva L., Teunova N.* Analysis of climate change in the Caucasus region: End of the 20th — Beginning of the 21st Century // *Climatic Change*. 2019. V. 7 (11). [https://doi.org/ 10.3390/cli7010011](https://doi.org/10.3390/cli7010011)
- Tielidze L. G., Wheate R. D.* The greater caucasus glacier inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan) // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. № 1. P. 81—94. [https://doi.org/ 10.5194/tc-12-81-2018](https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018)
- Tielidze L. G., Jomelli V., Nosenko G. A.* Analysis of Regional Changes in Geodetic Mass Balance for All Caucasus Glaciers over the Past Two Decades // *Atmosphere*. 2022. V. 13. № 2. P. 256. [https://doi.org/ 10.3390/atmos13020256](https://doi.org/10.3390/atmos13020256)
- Toropov P. A., Aleshina M. A., Grachev A. M.* Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th — 21st century // *International Journ. of Climatology*. 2019. V. 39. № 12. P. 4703—4720. [https://doi.org/ 10.1002/joc.6101](https://doi.org/10.1002/joc.6101)
- Vacco D. A., Alley R. B., Pollard D.* Glacier advance and stagnation caused by rock avalanches // *Earth Planet. Sc. Lett*. 2010. V. 294. P. 123—130. [https://doi.org/ 10.1016/j.epsl.2010.03.019](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.03.019)
- Verhaegen Y., Huybrechts P., Rybak O. and Popovnin V.* Modelling the evolution of Djankuat Glacier, North Caucasus, from 1752 until 2100 CE // *The Cryosphere*. 2020. V. 14. № 11. P. 4039—4061. [https://doi.org/ 10.5194/tc-14-4039-2020](https://doi.org/10.5194/tc-14-4039-2020)
- Zekollari H., Huss M., Farinotti D.* Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble // *The Cryosphere*. 2019. V. 13. № 4. P. 1125—1146. [https://doi.org/ 10.1029/2019gl085578](https://doi.org/10.1029/2019gl085578)

Citation: Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Yu.G., Korneva I.A., Postnikova T.N., Rybak O.O. Changes in water regime in the high-mountain region of the Terek River (North Caucasus) in connection with climate change and degradation of glaciation. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (2): 173–188. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424020014

Changes in water regime in the high-mountain region of the Terek River (North Caucasus) in connection with climate change and degradation of glaciation

E. D. Kornilova^{1,2*}, I. N. Krylenko^{1,2}, E. P. Rets², Yu. G. Motovilov², I. A. Korneva^{3,4},
T. N. Postnikova², O. O. Rybak^{2,4}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

²Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

³Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

⁴Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia

*e-mail: ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com

Received February 20, 2023 / Revised March 28, 2023 / Accepted April 10, 2024

In this study, we adapted the ECOMAG model of the runoff formation for analysis of the Terek River basin using comprehensive hydrometeorological information as well as data on soils, landscape, and glaciation. To take account of regional characteristics of the glaciation, the additional ice module was used with the model. This improvement has resulted in a satisfactory agreement between the modeled runoff hydrographs and the observed ones. In our simulations we used the updated glacier cover predictions from the global glaciological model GloGEMflowdebris together with regional climate projections from the CORDEX experiment to determine possible future changes in the Terek River flow in the 21st century. The results show that the runoff will change between -2% and $+5\%$ according to the RCP2.6 scenario, and from -8% to $+14\%$ in the RCP8.5 scenario. The directedness of the runoff changes in particular subbasins of the River will essentially depend on the altitude position of the snow and glacier feeding zones, that is responsible for the intensity of their degradation. Thus, in the RCP8.5 scenario, the flow of the Chegem River will begin to decrease significantly in the second half of the 21st century. In contrast, the predicted increasing of the runoff in Malka and Baksan rivers, which are primarily fed by meltwater from glaciers and snow on Elbrus and other high-mountain zones, is expected to be continued until the end of the century. But this increase may be caused only by a growth of a part of the snowmelt feeding due to greater winter precipitation. The model estimates confirm the present-day observed trends within the intra-annual runoff distribution, demonstrating the earlier start of the spring flood, a decrease in summer runoff volumes and then its increase in the autumn months. The results of the research may be used for more efficient management of water resources in the North Caucasus in the future, including electricity generation and water supply.

Keywords: mountain hydrology, runoff formation modeling in mountainous regions, North Caucasus, Terek River, climate change, glacier degradation, CORDEX, GloGEMflow-debris, ECOMAG

REFERENCES

- Borsch S. V., Simonov Y. A., Khristoforov A. V. *Prognozirovanie stoka rek Rossii*. Streamflow forecasting in Russia. Moscow: Hydrometcenter of Russia, 2023: 200 p. [In Russian]
- Korneva I. A., Pybak O. O., Rybak E. A. Climate projections for Central Caucasus (CORDEX experiment results). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*. Monitoring systems of environment. 2020, 4: 5–12. [In Russian]
- Korneva I. A., Pybak O. O. Correction of the model climatic data for simualtion of the Central Caucasus mountain glaciers. *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*. Monitoring systems of environment. 2024, 1 [In Russian] (в печати)
- Korovin V. I., Galkin G. A. Genetic structure of floods and flash-floods in the Western North Caucasus during 275 years. *Izvestija Akademii Nauk of SSSR*. Proceedings of the USSR Academy of Sciences. 1979, 3: 90–94. [In Russian]
- Motovilov Yu. G., Gelfan A. N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachax gidrologii rechnyx bassejnov*. Models of runoff formation in problems of river basin hydrology. Moscow: Russian Academy of Sciences,

- 2018: 300 p. [In Russian]. <https://doi.org/10.31857/S9785907036222000001>
- Nosenko G. A., Khromova T. E., Rototaeva O. V., Shakhgedanova M. V. Glacier reaction to temperature and precipitation change in Central Caucasus, 2001–2010. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2013, 53 (1): 26–33. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-1-26-33>
- Adler C., Huggel C., Orlove B., Nolin A. Climate change in the mountain cryosphere: impacts and responses. *Regional Environmental Change*. 2019, 19: 1225–1228. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01507-6>
- Bliss A., Hock R., Radić V. Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change. *Journ. of Geophysical Research: Earth Surface*. 2014, 119 (4): 717–730. <https://doi.org/10.1002/2013JF002931>
- Duethmann D., Bolch T., Farinotti D., Kriegel D., Vorogushyn S., Merz B., Pieczonka T., Jiang T., Su B., Güntner A. Attribution of streamflow trends in snow and glacier melt-dominated catchments of the Tarim River, Central Asia. *Water Resources Research*. 2015, 51 (6): 4727–4750. <https://doi.org/10.1002/2014WR016716>
- Gelfan A., Semenov V.A., Gusev E., Motovilov Y., Nasonova O., Krylenko I., Kovalev E. Large-basin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by internal atmospheric variability. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2015, 19 (6): 2737–2754. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2737-2015>
- Hagg W., Shahgedanova M., Mayer C., Lambrecht A., Popovnin V. A sensitivity study for water availability in the Northern Caucasus based on climate projections. *Global and Planetary Change*. 2010, 73 (3–4): 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.05.005>
- Hamed K. H., Rao A. R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journ. of hydrology*. 1998, 204 (1–4): 182–196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Huss M., Fischer M. Sensitivity of very small glaciers in the Swiss Alps to future climate change. *Frontiers in Earth Science*. 2016, 4: 34. <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00034>
- Jones J. A. Hydrologic responses to climate change: considering geographic context and alternative hypotheses. *Hydrological Processes*. 2011, 25 (12): 1996–2000. <https://doi.org/10.1002/hyp.8004>
- Kraaijenbrink P. D. A., Bierkens M. F. P., Lutz A. F., Immerzeel W. W. Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers. *Nature*. 2017, 549: 257–260. <https://doi.org/10.1038/nature23878>
- Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrikov D. Volume changes of Elbrus glaciers from 1997 to 2017. *Frontiers in Earth Science*. 2019, 7: 153. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00153>
- Lüthi S., Ban N., Kotlarski S., Steger C.R., Jonas T., Schär C. Projections of alpine snow-cover in a high-resolution climate simulation. *Atmosphere*. 2019, 10 (8): 463. <https://doi.org/10.3390/atmos10080463>
- Marty C., Schlögl S., Bavay M., Lehning M. How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps. *The Cryosphere*. 2017, 11 (1): 517–529. <https://doi.org/10.5194/tc-11-517-2017>
- Milner A. M., Khamis K., Battin T. J., Brittain J. E., Barrand N. E., Füreder L., Cauvy-Fraunié S., Gíslason G. M., Jacobsen D., Hannah D. M., Hodson A. J., Hood E., Lencioni V., Ólafsson J. S., Robinson C. T., Tranter M., Brown L. E. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017, 114 (37): P. 9770–9778. <https://doi.org/10.1073/pnas.1619807114>
- Motovilov Yu., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Department of Geophysics, University of Oslo, 1999: 88.
- Omani N., Srinivasan R., Karthikeyan R., Smith P. Hydrological modeling of highly glacierized basins (Andes, Alps, and Central Asia). *Water*. 2017, 9 (2): 111. <https://doi.org/10.3390/w9020111>
- Pellicciotti F., Bauder A., Parola M. Effect of glaciers on streamflow trends in the Swiss Alps. *Water Resources Research*. 2010, 46 (10): 1–16. <https://doi.org/10.1029/2009WR009039>
- Postnikova T., Rybak O., Gubanov A., Zekollari H., Huss M., Shahgedanova M. Debris cover effect on the evolution of Northern Caucasus glaciers in the 21st century. *Frontiers in Earth Science*. 2023, 11 (1): 1–22. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1256696>
- Rafiq M., Mishra A. Investigating changes in Himalayan glacier in warming environment: a case study of Kola-hoi glacier. *Environmental Earth Sciences*. 2016, 75: 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6282-1>
- Rahman K., Maringanti C., Beniston M., Widmer F., Abbaspour K., Lehmann A. Streamflow modeling in a highly managed mountainous glacier watershed using SWAT: the Upper Rhone River watershed case in Switzerland. *Water resources management*. 2013, 27 (2): 323–339. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0188-9>
- Rets E. P., Durmanov I. N., Kireeva M. B. Peak runoff in the north Caucasus: Recent trends in magnitude, variation and timing. *Water Resources*. 2019, 46 (1): 56–66. <https://doi.org/10.1134/S0097807819070157>
- Rets E. P., Durmanov I. N., Kireeva M. B., Smirnov A. M., Popovnin V. V. Past 'peak water' in the North Caucasus: Deglaciation drives a reduction in glacial runoff impacting summer river runoff and peak discharges. *Climatic Change*. 2020, 163 (4): 2135–2151. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02931-y>
- Rets E., Kireeva M. Hazardous hydrological processes in mountainous areas under the impact of recent climate change: case study of Terek River basin. *IAHS Publ*. 2010, 340: 126–134.
- RGI 6.0 Consortium, 2017. Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines, Version 6.0. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. Retrieved from: <https://nsidc.org>

- org/data/nsidc-0770/versions/6 (Last access: 26 February 2023). <https://doi.org/10.5067/f6jmovy5navz>
- Santer B. D., Wigley T. M. L., Boyle J. S., Gaffen D. J., Hnilo J. J., Nychka D., Parker D. E., Taylor K. E.* Statistical significance of trends and trend differences. *Journ. of Geophys. Research.* 2000, 105 (6): 7337–7356. <https://doi.org/10.1029/1999JD901105>
- Shahgedanova M., Hagg W., Zacios M., Popovnin V.* An Assessment of the recent past and future climate change, glacier retreat, and runoff in the caucasus region using dynamical and statistical downscaling and HBV-ETH hydrological model. *Regional Aspects of Climate-Terrestrial-Hydrologic Interactions in Non-boreal Eastern Europe.* 2009: 63–72. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2283-7_8
- Singh V., Jain S. K., Shukla S. K.* Glacier change and glacier runoff variation in the Himalayan Baspa River basin. *Journ. of Hydrology.* 2021, 593: 125918 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125918>
- Tashilova A., Ashabokov B., Kesheva L., Teunova N.* Analysis of climate change in the Caucasus region: End of the 20th – Beginning of the 21st Century. *Climate.* 2019, 7 (11). <https://doi.org/10.3390/cli7010011>
- Tielidze L. G., Wheate R. D.* The Greater Caucasus Glacier Inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan). *The Cryosphere.* 2018, 12 (1): 81–94. <https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018>
- Tielidze L. G., Jomelli V., Nosenko G. A.* Analysis of Regional Changes in Geodetic Mass Balance for All Caucasus Glaciers over the Past Two Decades. *Atmosphere.* 2022, 13 (2): 256. <https://doi.org/10.3390/atmos13020256>
- Toropov P. A., Aleshina M. A., Grachev A. M.* Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th – 21st century. *International Journ. of Climatology.* 2019, 39 (12): 4703–4720. <https://doi.org/10.1002/joc.6101>
- Vacco D. A., Alley R. B., Pollard D.* Glacier advance and stagnation caused by rock avalanches. *Earth Planet. Sc. Lett.* 2010, 294: 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.03.019>
- Verhaegen Y., Huybrechts P., Rybak O. and Popovnin V.* Modelling the evolution of Djankuat Glacier, North Caucasus, from 1752 until 2100 CE. *The Cryosphere.* 2020, 14 (11): 4039–4061. <https://doi.org/10.5194/tc-14-4039-2020>
- Zekollari H., Huss M., Farinotti D.* Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere.* 2019, 13 (4): 1125–1146. <https://doi.org/10.1029/2019gl085578>