

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Корнилова Екатерина Дмитриевна

**Моделирование речного стока и трансформация механизмов
его формирования в высокогорной части бассейна р. Терек
при изменении климата**

1.6.16 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре гидрологии суши
Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – *Крыленко Инна Николаевна,*
кандидат географических наук
- Официальные оппоненты** – *Попов Сергей Викторович,*
доктор физико-математических наук, доцент
кафедры гидрологии суши Института наук о Земле
Санкт-Петербургского государственного
университета
- Земцов Валерий Алексеевич,*
доктор географических наук, профессор,
зав. кафедрой гидрологии Национального
исследовательского Томского государственного
университета
- Георгиади Александр Георгиевич,*
кандидат географических наук, ведущий научный
сотрудник лаборатории гидрологии Института
географии РАН

Защита диссертации состоится «16» мая 2024 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801 (тел. +7(495)9392238, факс +7 (495)9328836).

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.2/2962>

Автореферат разослан «11» апреля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Северный Кавказ – один из наиболее густонаселенных и развитых в сельскохозяйственном отношении регионов Российской Федерации. В меженные периоды обеспечение территории водными ресурсами преимущественно зависит от высокогорных районов и может быть недостаточным в засушливые сезоны [Данилов-Данильян, Хранович, 2010; Rets, Kireeva, 2010; Рыбак, Рыбак, 2021].

Глобальные изменения климата, проявляющиеся в повышении температуры воздуха, приведут к серьезным изменениям условий формирования стока в горных регионах [Jones, 2011; Adler et al., 2019]. Особенно это скажется на оледенении [Rafiq, Mishra, 2016; Kraaijenbrink et al., 2017] и снежном покрове [Marty et al., 2017; Lüthi et al., 2019], что вызовет значительную трансформацию водного режима [Milner et al. 2017]. Поэтому для эффективного использования водных ресурсов, включая гидроэнергетику и водоснабжение, необходимо глубокое понимание того, как изменение климата повлияет на гидрологические процессы в высокогорье. Типичным примером реки, на режиме стока которой наиболее отчетливо могут проявиться данные процессы, является Терек, верхняя часть бассейна которого включает в себя ледники Большого Кавказа.

Площадь ледников Большого Кавказа уменьшалась в среднем на 0.44% в год в период с 1960 по 1986 гг. и на 0.69% в год в период с 1986 по 2014 гг. [Tielidze, Wheate, 2018]. Если экстраполировать такие темпы дегляциации, то уже через 30 лет площадь оледенения Кавказских гор может уменьшиться на 25%, через 70 лет – на 50%. Согласно прогностическим моделям, площадь оледенения Кавказа к концу XXI в. может сократиться на 60–90% в зависимости от климатического сценария [Marzeion et al., 2020]. По последним оценкам, продолжающееся изменение климата [Shahgedanova et al., 2009; Tashilova et al., 2019] и деградация оледенения Северного Кавказа [Золотарев, Харьковец, 2012; Shahgedanova et al., 2014; Kutuzov et al., 2019; Toropov et al., 2019] уже привели к значительным изменениям объема и режима речного стока [Rets et al., 2020].

Ожидаемым следствием дегляциации на начальном этапе является увеличение объема стока рек за счет усиления таяния ледников. Однако отрицательный баланс массы ледников приводит к уменьшению объема и площади оледенения, что в конечном итоге приводит к уменьшению 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 как к увеличению, так и к уменьшению речного стока в зависимости от степени отступления ледников [Pellicciotti et al., 2010].

Помимо общего потепления, свой вклад в изменение стока вносит фоновое изменение осадков. В связи с этим может происходить эпизодическое увеличение

максимальных расходов воды, связанное с прорывными паводками прогляциальных озер, количество которых будет возрастать [Petrakov et al., 2012; Carrivick, Tweed, 2016; Harrison et al., 2018; Tielidze et al., 2020]. Все вышеперечисленное обуславливает необходимость проведения детальных региональных исследований для освоенных горных регионов с использованием наиболее актуальной информации об оледенении и прогнозах его деградации в результате изменения климатических факторов.

В ходе современных исследований в различных высокогорных бассейнах мира широко используются методы математического моделирования [Rahman et al., 2013; Omani et al., 2017; Singh et al., 2021]. При этом модели формирования стока позволяют оценить влияние климатических факторов и сокращения оледенения на речной сток [Bliss et al., 2014; Duethmann et al., 2015; Huss, Fischer, 2016], а гидродинамические модели могут использоваться для оценки экстремальных расходов при прорывах прогляциальных озер в речные долины [Westoby et al., 2015; Anacona et al., 2015; Mergili et al., 2020]. Однако, для бассейна р. Терек комплексных оценок возможных изменений объема и режима стока с учетом уменьшения площади оледенения на основе методов моделирования до последнего времени не проводилось, что и обуславливает актуальность настоящего исследования.

Цель исследования – оценка влияния изменений климата и оледенения на речной сток и трансформацию механизмов его формирования в бассейне р. Терек на основе математического моделирования.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

- 1) провести анализ фактических метеорологических и гидрологических данных, выявить текущие тенденции изменений различных характеристик стока и метеорологических факторов;
- 2) создать информационную основу для моделирования;
- 3) адаптировать, откалибровать, провести валидацию модели формирования стока;
- 4) провести численные эксперименты по оценке чувствительности характеристик водного режима к изменению входных условий;
- 5) разработать схемы усвоения моделью формирования стока данных из климатической и гляциологической модели;
- 6) выполнить сценарные расчеты изменения стока и его генетических составляющих на основе модели формирования стока и данных гляциологического и климатического моделирования;
- 7) провести гидродинамическое моделирование прорывного паводка и оценить его влияние на расходы воды.

Объектом исследования является высокогорная часть бассейна р. Терек, **предметом исследования** – механизмы формирования стока с высокогорного водосбора.

Материалы и методы. При проведении исследований использовались архивные данные гидрометеорологического мониторинга, карты характеристик подстилающей поверхности (почвы, ландшафты) бассейна масштаба 1 : 750 000, цифровая модель рельефа SRTM (90м×90м), данные расчетов гляциологической модели (GloGEMflow-debris) и мезомасштабных моделей климата (проект CORDEX). В качестве базового программного комплекса для моделирования процессов формирования стока в бассейне р. Терек использовался российский информационно-моделирующий комплекс (ИМК) ECOMAG (ECOLOGical Model for Applied Geophysics, автор модели Ю.Г. Мотовилов) [Motovilov et al., 1999; Мотовилов, 2013]. Модель ECOMAG имеет широкую географию применения как для равнинных [Мотовилов, Гельфан, 2019], так и для горных регионов [Gelfan et al., 2016; Motovilov et al., 2017], однако в представленном исследовании она впервые специально адаптирована для детальной оценки влияния изменений оледенения и климата на сток в высокогорном бассейне.

При проверке модели формирования стока в гляциально-нивальном зоне Центрального Кавказа использовались данные о снежном покрове со снимков спектрорадиометра MODIS с суточным шагом, предоставленные А. Гафуровом, материалы работы ледникового отряда МГУ на гляциологической станции Джанкуат, собранные при участии автора, а также данные WGMS (World Glacier Monitoring Service – Всемирная служба мониторинга ледников) [WGMS, 2024].

Данные об изменении площади оледенения в пределах водосбора Терека были получены на основе модифицированной версии модели GloGEMFlow [Zekollari et al., 2019], получившей название GloGEMflow-debris ввиду включения блока расчета моренного покрова [Postnikova et al., 2023] (предоставлены Т.Н. Постниковой в рамках выполнения совместного проекта РФФИ № 21-55-10003). В рамках того же проекта была проведена обработка результатов мезомасштабного климатического моделирования CORDEX [Корнева, Рыбак, 2020], которые послужили основными метеорологическими входными данными при оценке реакции стока на изменения климата.

Для оценки гидрографа прорывного паводка в долине р. Адыл-Су использовалась отечественная гидродинамическая модель STREAM_2D [Алексюк, Беликов, 2017].

Для решения задач широко использовались собственные программы, написанные на языке Python. Для статистической и графической обработки применялись программное обеспечение ArcGIS и Microsoft Excel.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Разработаны методические подходы к моделированию речного стока в высокогорном бассейне с высокой долей оледенения, модифицирован

ледниковый блок модели формирования стока ECOMAG, разработаны алгоритмы усвоения ею данных гляциологической модели, проведена оценка чувствительности результатов моделирования к изменениям параметров оледенения.

2. Для высокогорной части бассейна р. Терек на основе собранной автором обширной гидрометеорологической и физико-географической информации впервые адаптирована модель формирования стока, обеспечивающая удовлетворительное качество моделирования гидрографов стока; проведена валидация модели по данным об абляции опорных ледников, генетическим составом стока, покрытости снегом.
3. Впервые на основе модели формирования стока по данным расчетов гляциологической и климатических моделей проведена оценка возможных изменений стока с высокогорной части бассейна р. Терек и трансформации механизмов его формирования с учетом изменений климата и оледенения в XXI в. для различных климатических сценариев.
4. Для прогнозирования экстремальных гидрологических событий и оценки влияния прорывных паводков на сток рек высокогорных регионов было выполнено ретроспективное моделирование прорыва озера Башкара 1 сентября 2017 г., для чего были синтезированы модель формирования стока ECOMAG и гидродинамическая модель STREAM_2D.

Практическая значимость проведенных исследований заключается в том, что разработанная модель формирования стока может быть использована для организации системы мониторинга опасных гидрологических процессов в высокогорных бассейнах. Результаты исследований могут применяться для разработки перспективных схем эффективного использования водных ресурсов Северного Кавказа. Полученные в работе прогностические оценки изменения объема и режима речного стока позволяют заблаговременно спланировать мероприятия по повышению надежности и эффективности эксплуатации сооружений и предотвращению ущерба населению и хозяйственным объектам до конца XXI в.

Результаты работы были использованы при выполнении проекта РФФИ № 21-55-10003 «Моделирование эволюции оледенения Кавказа в будущем и ее последствий для водных ресурсов и возникновения опасных явлений», проекта РФФИ № 20-35-70024 «Механизмы формирования речного стока и опасных гидрологических процессов в горных территориях в условиях нестационарного климата: современные экспериментальные и аналитические подходы к исследованию», а также по темам Госзадания МГУ имени М.В. Ломоносова, раздел I.10 (ЦИТИС 121051400038-1) и Госзадания Института водных проблем РАН, темы № FMWZ-2022-0001 и № FMWZ-2022-0003.

Защищаемые положения:

1. Адаптированная для высокогорной части бассейна р. Терек модель формирования стока ECOMAG при подключении модифицированного ледникового блока позволяет удовлетворительно описывать механизмы формирования стока в бассейне с высокой долей оледенения.
2. Изменение количества осадков и площади оледенения оказывают влияние на объемы стока теплого периода года, в то время как изменение температуры воздуха – на внутригодовое распределение стока.
3. Результаты моделирования демонстрируют тенденцию к снижению ледникового стока в XXI в., однако на фоне прогнозируемого роста осадков возможен как рост, так и снижение годового стока в зависимости от высотного расположения подбассейна и доли ледникового и снегового питания.
4. Трансформация механизмов формирования стока отражается в изменении водного режима – сдвиге начала половодья на более ранние сроки, уменьшении стока в летний период и его увеличении в весенние и осенние месяцы за счет изменения соотношения генетических составляющих стока.

Личный вклад автора. Использованный в работе информационно-моделирующий комплекс ECOMAG был разработан ранее Ю.Г. Мотовиловым в Институте водных проблем РАН. Автором диссертационной работы на основании анализа природно-климатических условий Большого Кавказа был модифицирован ледниковый блок модели. На этой основе была разработана модель формирования речного стока для высокогорной части бассейна р. Терек. Выполнена калибровка и валидация модели; проанализированы фактические метеорологические и гидрологические данные; выявлена направленность изменений различных характеристик стока и метеорологических характеристик; проведены численные эксперименты по оценке чувствительности стока р. Терек к изменению температуры воздуха, количества осадков и площади оледенения. Автором самостоятельно разработана технология взаимодействия моделей ECOMAG и STREAM_2D для условий прорывного паводка; разработаны схемы усвоения моделью ECOMAG данных из климатической и гляциологической модели; проведены сценарные расчеты изменения стока высокогорной части р. Терек, учитывающие как изменения климата, так и деградацию оледенения. Все результаты моделирования, включая построение графиков и карт, получены автором самостоятельно.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования были представлены на российских и зарубежных конференциях: Всероссийская научно-практическая конференция «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению» (Санкт-Петербург, 2020), Генеральная ассамблея Европейского геофизического союза (Австрия, 2021 и 2022), Международная научно-практическая конференция «Пятое Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху

перемен» (Санкт-Петербург, 2023), а также на научных семинарах кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ и отдела гидрологии речных бассейнов ИВП РАН.

Публикации. Итоги исследований изложены в 8 работах, в том числе в 3 статьях в рецензируемых научных изданиях, определенных в п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, и 5 докладах конференций.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из 5 глав, введения и заключения. Объем работы составляет 124 страницы, включая 66 рисунков и 14 таблиц. Библиографический список содержит 148 наименований, включающих 43 отечественных и 105 зарубежных изданий.

Благодарности. Автор выражает благодарность д.г.н. Ю.Г. Мотовилову, к.г.н. Е.П. Рец, всем сотрудникам отдела гидрологии речных бассейнов ИВП РАН и кафедры гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова за конструктивные советы при подготовке диссертации; руководителю ледникового отряда МГУ к.г.н. В.В. Поповнину и аспиранту А. Губанову за содействие и поддержку, другу А. Горбаренко за помощь с языками программирования, д.ф.-м.н. О.О. Рыбаку, к.г.н. Т.Н. Постниковой и к.г.н. И.А. Корневой за совместную экспериментальную работу по оценке влияния изменений оледенения и климата в XXI в. и предоставленные результаты моделирования гляциологической и климатических моделей. Также я благодарю свою семью и друзей за поддержку в период работы над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современные условия формирования стока в высокогорной части бассейна р. Терек

В разделе 1.1 приведено физико-географическое описание исследуемого бассейна. Бассейн р. Терек расположен в юго-восточной части территории Северного Кавказа. Высокогорная часть бассейна р. Терек включает такие крупные притоки, как р. Баксан, Чегем, Малка, Черек и Ардон. Для учета всех высокогорных притоков в работе был рассмотрен бассейн р. Терек до г. 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 (рисунок 1).

В бассейне Терека в распространении типов ландшафтов и почвенного покрова наибольшую роль играет рельеф и высотная поясность. Основными типами растительности в пределах исследуемой территории являются степная, лесостепная, лесная, субальпийская, альпийская и нивальная. Распространены чернозем, каштановые, лесные и горно-луговые почвы.

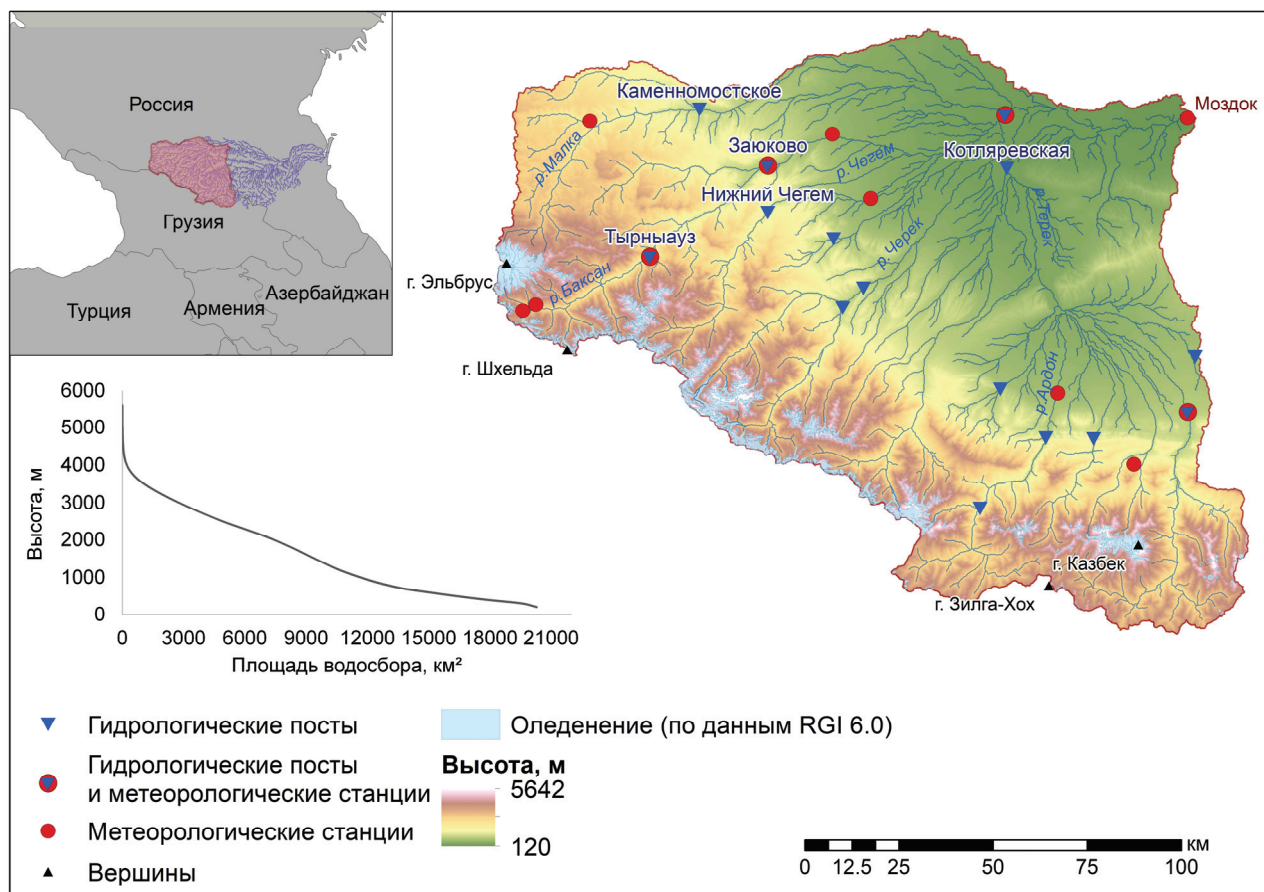


Рисунок 1 – Расположение и рельеф исследуемой высокогорной части бассейна р. Терек

Раздел 1.2 посвящен климатическим условиям исследуемого региона, а также анализу современных изменений метеорологических характеристик. Сложный рельеф Северного Кавказа, состоящий из разновысотных хребтов и котловин с большим диапазоном высот, является основным фактором, определяющим климатические особенности территории. Так, в пределах исследуемого бассейна наблюдаются значительные градиенты среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы осадков. В среднем по водосбору градиент температуры составляет $-0.47^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, годовой суммы осадков – $43\text{ мм}/100\text{ м}$. В пределах высокогорной части бассейна р. Терек наблюдается повсеместное увеличение среднегодовой температуры воздуха с интенсивностью до $1^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ за период 1977–2014 гг., что приводит к усилению дегляциации. Статистически значимых трендов изменения годовой суммы осадков по данным метеорологических станций не обнаружено, но в среднем наблюдаются положительные тенденции с интенсивностью $5\%/10\text{ лет}$.

В **разделе 1.3** рассматриваются особенности современного оледенения Центрального Кавказа. Ледники покрывают около 670 км^2 [RGI-6.0, 2017] в пределах исследуемого бассейна, 10% из которых составляют ледники вулканического массива горы Эльбрус. На Кавказе более 13% общей площади ледников покрыто моренными отложениями [Stokes et al., 2006], и доля замороженных ледников растет. Исследователями отмечается, что распространение моренного покрова достаточной

толщины потенциально может смягчить последствия изменения климата за счет снижения скорости таяния [Poroynin, 2015; Тиелидзе и др., 2020].

Раздел 1.4 освещает особенности речного стока и водного режима р. Терек, а также современные тенденции изменения различных характеристик стока. В работе использовались данные 15 гидрологических постов, в настоящее время действует 12 из них. Учитывая особенности формирования стока в горах, освещение территории гидрометрическими данными недостаточно. По результатам проведенного анализа, среднегодовые расходы воды за 1970–2018 гг. увеличиваются с интенсивностью 2–7%/10 лет. Для максимальных годовых расходов, наоборот, в большинстве случаев характерны отрицательные тенденции с интенсивностью снижения 2–10%/10 лет. Также выявлено увеличение стока в мае и июне, и, наоборот, снижение стока в июле и августе, что является следствием более раннего начала снеготаяния. Все вышеперечисленные тенденции способствуют видоизменению гидрографов горных рек и перераспределению источников питания, что может повлиять на водообеспечение региона.

Глава 2. Адаптация модели формирования стока ECOMAG для высокогорной части бассейна р. Терек

В **разделе 2.1** обоснован выбор модели формирования стока ECOMAG для решения задач исследования, описана география ее применения и сделан обзор существующих моделей формирования стока, которые используются в бассейнах горных рек с высокой долей оледенения. Для горных территорий в зарубежной практике применяется большое количество моделей, самые популярные из которых шведская “HBV” [Bergström, 1976] и ее аналог “HBV-light”, который был реализован в Швейцарии, американская “SWAT” [Arnold et al., 1998], швейцарские “WaSiM-ETH” [Schulla, Jasper, 2007], GERM [Huss et al., 2008] и PREVAH [Gurtz et al., 1999]. Рассмотрены различные подходы учета оледенения. Ледниковый блок большинства гидрологических моделей основан на индексно-температурном методе, то есть реализуется путем применения коэффициента таяния. Более сложные методы учета динамики ледников на основе энергобалансовых методов сложно перенести на региональный уровень из-за большого количества требуемых исходных данных. Поэтому для регионального моделирования стока в крупных бассейнах используются более простые подходы.

В **разделе 2.2** описана структура модельного комплекса ECOMAG, приведены основные уравнения модели и рассмотрены требования к исходным данным. По сравнению с другими моделями формирования стока с распределенными параметрами, ИМК ECOMAG отличается детальностью учета процессов формирования снежного покрова, промерзания и оттаивания почвы, основные подходы к описанию которых были разработаны в 1970–1990 гг. в Институте водных

проблем АН СССР (ныне ИВП РАН) под руководством Л.С. Кучмента [Кучмент и др., 1983] и далее развивались автором модели Ю.Г. Мотовиловым [Motovolov et al., 1999; Мотовилов, Гельфан, 2019]. Также существенным преимуществом ЕСОМАГ является его интеграция с ГИС, что позволяет в автоматическом режиме выделять ландшафтные единицы – элементарные водосборы и определять все характеристики подстилающей поверхности, необходимые для расчетов и задания начальных значений параметров модели.

Раздел 2.3 посвящен созданию баз исходной информации для модели формирования речного стока в бассейне р. Терек. Для адаптации модели формирования стока к конкретному бассейну необходимо собрать обширный объем информации о подстилающей поверхности и гидрометеорологические данные. Гидрометеорологическая информация для бассейна р. Терек была предоставлена Кабардино-Балкарским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, а также дополнена из метеорологической базы данных ИВП РАН. Сведения о ежедневных расходах воды по гидрологическим постам были получены на основании гидрологических ежегодников за период с 1977 по 2000 гг., с 2000 по 2019 гг. – на основании данных Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО, <https://gmvo.skniivh.ru/>).

В **разделе 2.4** описано построение речной сети и схематизация бассейна р. Терек с учетом оледенения. В качестве основной расчетной пространственной единицы (расчетной ячейки) принимается водосбор малой реки или элементарный водосбор. Всем элементарным водосборам передается информация о типах почв и ландшафтов, которая считывается с соответствующих карт и в дальнейшем усредняется с учетом весовых коэффициентов по занимаемой ими площади в пределах элементарного водосбора. Интерполяция метеорологических характеристик для каждого элементарного водосбора в модели проводится с учетом обратно взвешенных расстояний от метеостанций до центра элементарного водосбора и с учетом высотных градиентов температуры воздуха и осадков, заданных пользователем по фактическим данным. Для подключения ледникового блока модели ЕСОМАГ определялись площади и местоположение ледников на основе данных Randolph Glacier Inventory (RGI-6). Доля оледенения в пределах бассейна р. Терек составляет 3,3%, доля оледенения притоков, освещенных гидрометрическими данными, до 18% (например, р. Баксан – г. Тырныауз). Суммарно в пределах бассейна ледниками покрыто 214 удельных водосбора (из 2050), из которых 130 – более чем на 10%. При подключении ледникового блока при расчетах летнего таяния запасы воды на доли площади элементарных водосборов, где расположены ледники, не лимитируются в предположении, что после снеготаяния продолжается таяние ледников.

В разделе 2.5 представлена модификация ледникового блока ИМК ЕСОМАГ. В связи со значительными различиями между альбедо поверхностей снега и льда был введен параметр, отвечающий за коэффициент таяния льда (до модификации в модели применялся единый коэффициент таяния для льда и снега). Блок-схема расчета ледникового стока представлена на рисунке 2. Тестовые расчеты с подключением модифицированного ледникового блока показали, что наблюдается рост пиков расходов воды во вторую половину летнего периода (июль–октябрь), когда ледники преимущественно освобождаются от снега.



Рисунок 2 – Блок-схема работы ледникового блока модели ЕСОМАГ
($k_{\text{снег}}$ – коэффициент таяния снега, $k_{\text{лед}}$ – коэффициент таяния льда)

Раздел 2.6 посвящен калибровке и валидации модели ЕСОМАГ при расчетах по данным сетевых метеорологических наблюдений. Для калибровки и валидации использовались данные четырех гидрологических постов в различных частях бассейна: р. Баксан – г. Тырнауз, р. Баксан – с. Заюково, р. Чегем – с. Нижний Чегем, р. Малка – с. Каменноостское, р. Терек – ст. Котляревская. Остальные гидрологические посты, расположенные в пределах исследуемого бассейна, не использовались для калибровки, поскольку либо имеют зарегулированный сток, либо находятся на равнине на участках со значительным водозабором на нужды сельского хозяйства, либо имеют существенные пропуски в данных наблюдений. Для оценки качества моделирования использовались критерий эффективности моделирования Нэша-Сатклифа (NSE), систематическая ошибка ($BIAS$, %) и степень тесноты связи рассчитанных и фактических объемов стока за месяц (R^2); оценки проводились по суточным и месячным гидрографам (рисунок 3).

Результаты расчетов суточного стока признаются хорошими при значениях $NSE > 0.7$ и $BIAS < 10\%$, удовлетворительными – при $NSE > 0.4$ и $BIAS < 15\%$ [Борщ и др., 2023]. Согласно приведенным выше градациям критериев качества NSE и $BIAS$, в основном получены хорошие и удовлетворительные результаты моделирования расходов воды (таблица 1).

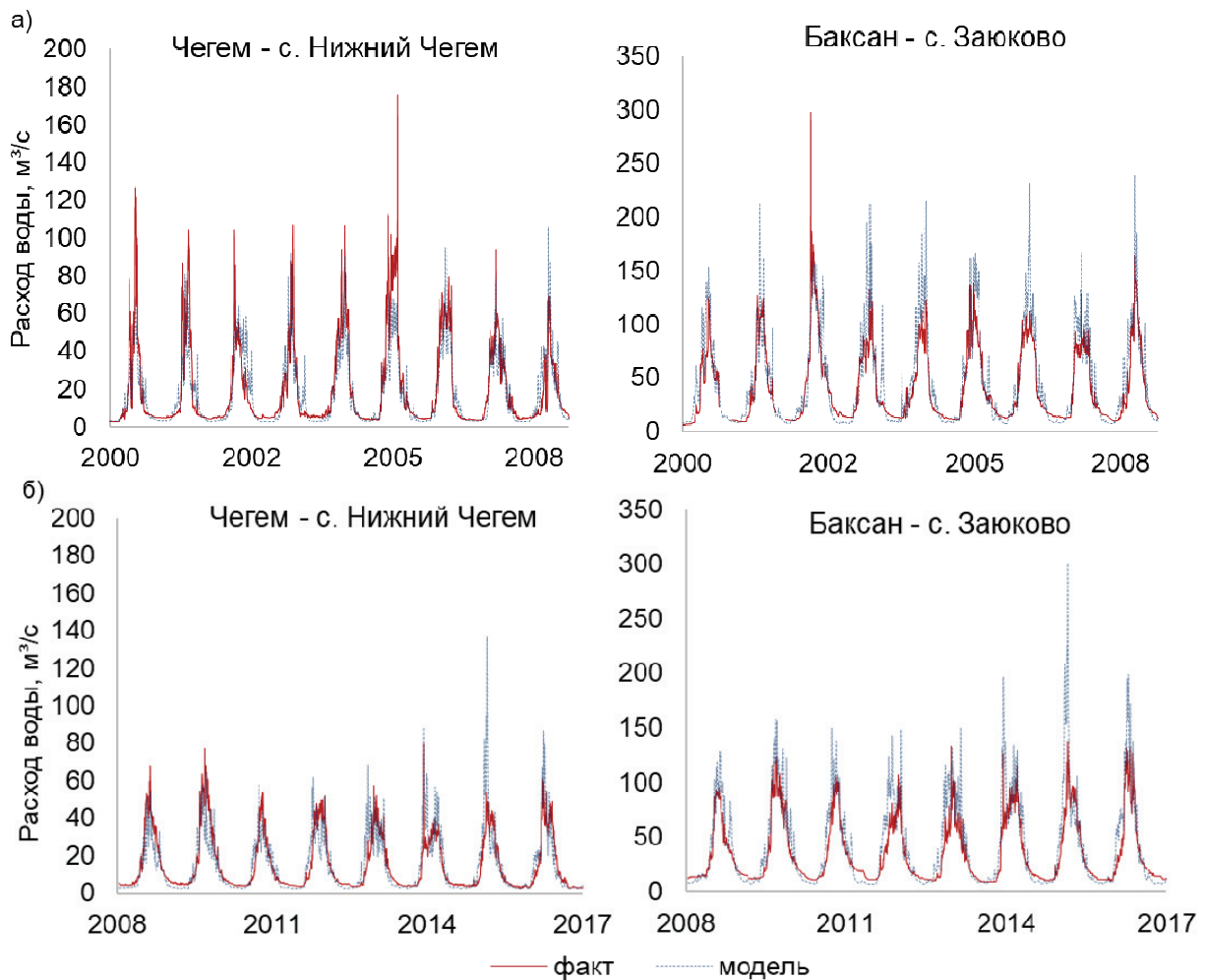


Рисунок 3 – Результаты калибровки (а) и валидации (б) модели ECOMAG по данным о расходах воды для гидрологических постов р. Чегем – с. Нижний Чегем и р. Баксан – с. Заюково

Таблица 1 – Критерии качества моделирования расходов воды в бассейне р. Терек на основе модели ECOMAG по данным метеорологических станций

Гидрологический пост	Оледенение, %	Площадь водосбора, км ²	Период калибровки 2000–2008 гг.			Период валидации 2009–2017 (*2009-2014) гг.		
			сутки		месяц	сутки		месяц
			<i>NSE</i>	<i>BIAS</i>	R^2	<i>NSE</i>	<i>BIAS</i>	R^2
р. Баксан – г. Тырныауз	17.5	838	0.76	–12.8	0.90	0.74	–10	0.90
р. Баксан – с. Заюково	7.4	2100	0.66	15.2	0.91	0.53	20	0.88
р. Чегем – с. Нижний Чегем	7.3	739	0.73	–12.4	0.84	0.62	–1.7	0.80
р. Малка – с. Каменноостское	3.4	1540	0.42	5.1	0.65	0.48*	5.3*	0.70*
р. Терек – ст. Котляревская	2.9	8920	0.56	–7	0.72	0.45*	–9.4*	0.68*

Глава 3. Оценка возможностей учета в ИМК ECOMAG особенностей высокогорных территорий

Раздел 3.1 посвящен валидации модели по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS о покрытости водосбора снегом. Маски покрытости снежным покровом для бассейна р. Баксан были любезно предоставлены автором методики обработки спутниковых данных [Gafurov, 2009]. Сравнение данных о покрытости снегом MODIS и результатов моделирования показало, что модель корректно воспроизводит внутригодовой ход изменения снежного покрова – максимум наблюдается в феврале, затем идет постепенное снижение с минимумом в августе, и после увеличение покрытости до декабря. Результаты моделирования покрытости снегом на конец августа хорошо совпадают с данными MODIS и в целом соответствуют среднегодовому положению климатической снеговой линии.

В **разделе 3.2** представлены результаты валидации модели ECOMAG по данным масс-балансовых исследований опорных ледников Центрального Кавказа – Джанкуат и Гарабаши. Для этого фактические значения суммарного таяния (абляции) опорных ледников за 2000–2009 гг. [WGMS, 2024] сравнивались с суммарными модельными значениями таяния снега и льда за май–сентябрь в пределах элементарного водосбора, где расположен ледник. В связи с тем, что в реальных условиях процессы таяния и распределения снега и льда в столь расчлененном рельефе намного сложнее, возникает систематическая ошибка – заниженные относительно фактических модельные результаты. Наилучшее соответствие модельных оценок фактическим данным получено для ледника Гарабаши (относительная ошибка составила –12%), который относится к ледниковому комплексу г. Эльбрус и отличается более пологим рельефом, чем ледник Джанкуат.

Раздел 3.3 посвящен валидации модели формирования стока на основе результатов изотопного анализа. Отчетливое различие изотопного состава талых ледниковых и снеговых вод и жидких осадков позволяет оценить соотношение этих компонентов к общему речному стоку. В течение 2020–2021 гг. без привязки к определенным событиям вдоль р. Баксан с участием автора работы осуществлялся отбор проб на изотопный анализ. Из всех дат пробоотбора были выбраны даты в середине месяца для сравнения с модельными результатами. Согласно сравнению, во-первых, подтверждено, что модель отображает внутригодовую изменчивость источников питания – снижение доли талого стока и, наоборот, увеличение дождевого стока в течение летнего периода. Во-вторых, как по результатам изотопного анализа, так и по модельным расчетам доля талого стока закономерно уменьшается, а доля дождевого стока увеличивается от верхнего течения к нижнему.

В **разделе 3.4** представлены результаты моделирования стока с учетом прорывных паводков (на примере прорывного паводка из оз. Башкара 01.09.2017г.). С

целью детального исследования влияния прорывного паводка на сток р. Баксан в работе использовался комплекс моделей. На основе гидродинамической модели STREAM_2D с применением детальной цифровой модели рельефа и батиметрии озер реконструировался прорывной гидрограф и движение паводка по долине р. Адыл-Су. Затем полученный гидрограф использовался в качестве входных данных для моделирования стока р. Баксан и оценки вклада прорывного паводка по ее длине на основе модельного комплекса ECOMAG (рисунок 4). На прорывной паводок приходится почти весь расход воды ниже по течению от озера. После впадения р. Адыл-Су в р. Баксан вклад прорывного паводка снижается и становится равным вкладу дождевого стока на расстоянии 40 км от места прорыва.

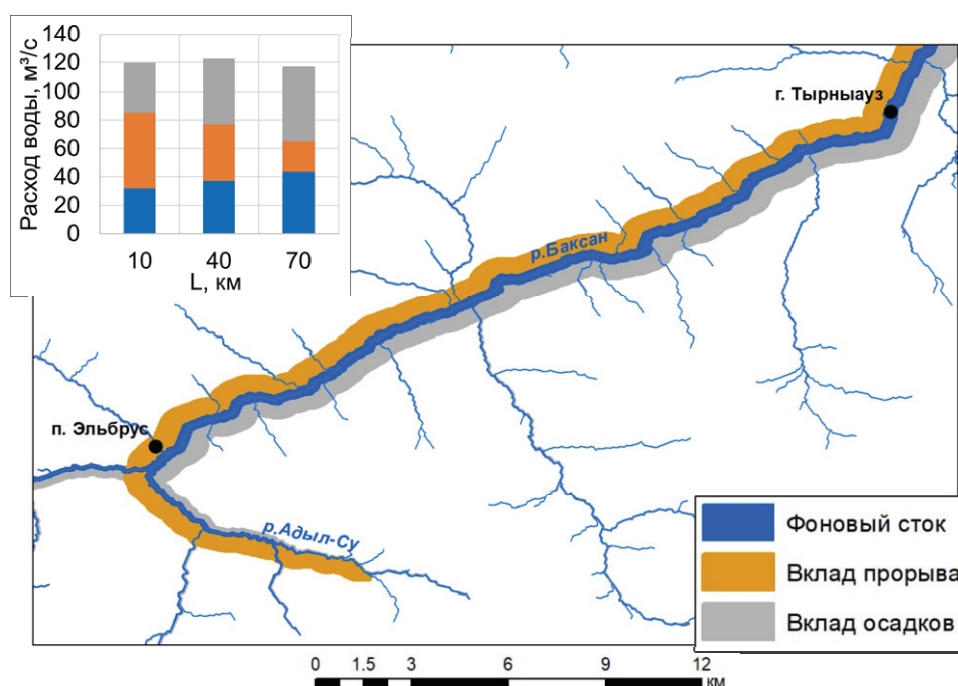


Рисунок 4 – Распространение влияния прорывного паводка на сток р. Баксан по результатам моделирования прорывного паводка из оз. Башкара 01.09.2017 г.

Глава 4. Численные эксперименты по оценке чувствительности характеристик водного режима к изменению входных условий

Численные эксперименты проводились по данным для периода с 2010 по 2020 гг. с учетом модификации различных входных условий по методу “delta-change” [Кучмент др., 1990]. При таком подходе вводятся постоянные поправки к входным условиям на период расчета, и оценивается изменение результатов моделирования.

В разделе 4.1 представлены результаты численных экспериментов по оценке чувствительности характеристик водного режима к изменению площади оледенения. Результаты эксперимента показывают, что, во-первых, изменение площади оледенения в большей мере влияет на сток в высокогорной части бассейна – сток уменьшается при уменьшении площади оледенения и наоборот. При движении вниз

по течению влияние ослабевает – при отдалении от очагов оледенения сток снижается. Во-вторых, изменение оледенения преимущественно влияет на расходы воды в июле–октябре, на которые приходится период интенсивного таяния уже открытых от снега ледников. В-третьих, изменение максимальных расходов при сокращении площади оледенения незначительно, так как в данном регионе они формируются в результате наложения крупных паводков на основную волну половодья.

Раздел 4.2 посвящен численным экспериментам по оценке чувствительности характеристик водного режима к изменению количества осадков. В результате выявлено, что объемы годового стока изменяются пропорционально изменению количества осадков. При этом наибольшие изменения объемов стока наблюдаются с мая по октябрь – в период положительных температур воздуха. Также наблюдается значительная чувствительность максимальных расходов воды к изменению количества осадков.

В **разделе 4.3** представлены результаты численных экспериментов по оценке чувствительности характеристик водного режима к изменению температуры воздуха. Влияние изменения температуры воздуха на сток при движении вниз по течению ослабевает в связи с уменьшением доли снегового и ледникового питания. Наблюдается сдвиг половодья на более ранние сроки, снижение летних расходов воды и, наоборот, увеличение весеннего и осеннего стока.

Глава 5. Оценка возможных изменений стока высокогорной части бассейна р. Терек по модели ECOMAG при расчетах на основе данных гляциологической и климатических моделей

В **разделе 5.1** описана разработка схемы усвоения моделью ECOMAG данных из климатической и гляциологической модели (рисунок 5).

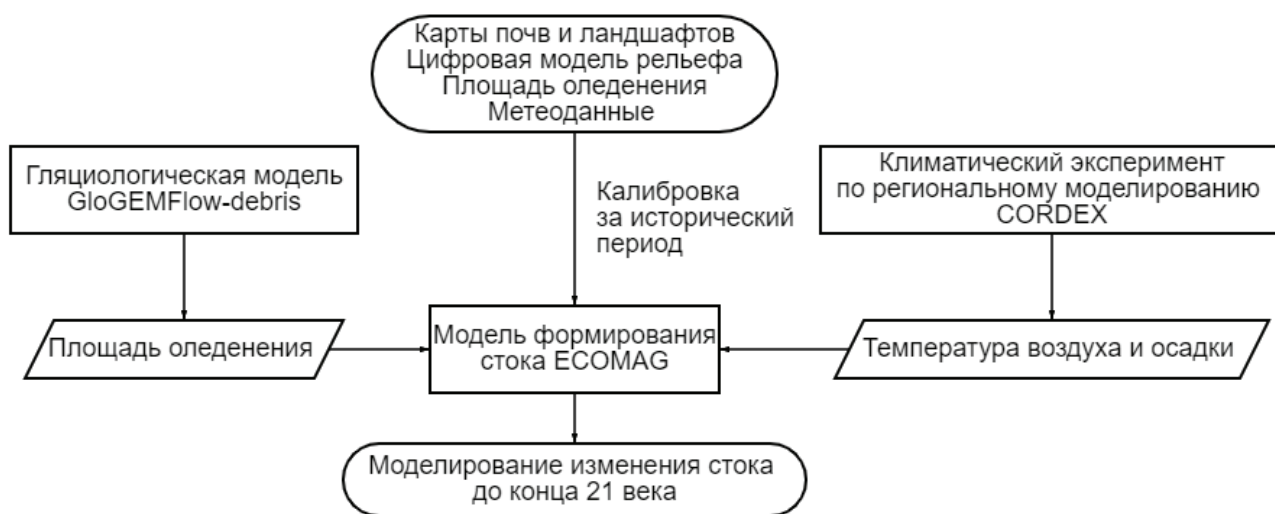


Рисунок 5 – Схема усвоения данных климатического и гляциологического моделирования моделью формирования стока ECOMAG

Данные мезомасштабного климатического моделирования были получены на основе данных проекта CORDEX, прошедших процедуры регионализации [Корнева, 2024]. В итоге в модель ECOMAG с суточным шагом подаются сеточные данные о приземной температуре и сумме атмосферных осадков с пространственным разрешением данных 1*1 км за исторический период 1977–2005 гг. и прогностический – до 2100 г.

В качестве выходных данных гляциологической модели GloGEMflow-debris [Postnikova et al., 2023] были предоставлены изменения площади отдельных ледников и площади их заморенности на территории исследуемого бассейна. 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. Для учета покрытости моренными отложениями рассчитывался коэффициент редукции таяния, зависящий от толщины моренного чехла. Таким образом, учитывалось не только уменьшение площади оледенения, но и эффект уменьшения таяния за счет увеличения моренного чехла.

В разделе 5.2 описаны и проанализированы возможные изменения климата и оледенения в XXI в. по данным климатического эксперимента CORDEX и гляциологической модели GloGEMflow-debris. Для оценки возможного диапазона изменений стока в высокогорной части бассейна р. Терек рассматривались два климатических сценария эмиссии парниковых газов: RCP2.6 («мягкий») и RCP8.5 («жесткий»). Для анализа вычислялись аномалии осредненных за периоды 2006–2039, 2040–2069, 2070–2099 гг. гидрометеорологических характеристик относительно аналогичных, смоделированных за базовый исторический период 1977–2005 гг.

По данным климатического моделирования ожидается, что среднегодовые температуры воздуха на территории бассейна р. Терек повысятся на 1°C и на 4°C к последней трети XXI в. (2070–2099 гг.) при сценарии RCP2.6 и RCP8.5 соответственно (рисунок 6а). При анализе внутригодового хода осредненной 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°C и 6–7°C при аналогичных сценариях. При этом аномалии температуры воздуха в зимние месяцы меньше, в том числе отрицательные (рисунок 7а). Вслед за ростом температуры возрастает испарение с поверхности исследуемого бассейна р. Терек. При реализации сценария RCP2.6 испарение к последней трети XXI в. возрастет на 8%, при этом в сценарии RCP8.5 – более чем на 25%.

Согласно результатам гляциологического моделирования, к 2100 г. площадь оледенения в высокогорной части бассейна р. Терек уменьшится на 55% в сценарии RCP2.6 и на 90% в сценарии RCP8.5. Ледники имеют различное высотное расположение, что обуславливает различия в изменении площади оледенения для конкретных водосборов (рисунок 6б). В пределах водосбора р. Малка, которая

питается преимущественно стоком с ледников, расположенных на северных и северо-восточных склонах Эльбруса, площадь оледенения в сценарии RCP8.5 к концу столетия сократится на 75%, а в пределах водосбора р. Чегем, питающейся талой водой с ледников северного склона Большого Кавказского хребта, площадь оледенения, согласно модельным оценкам, может снизиться практически на 100%.

Ожидается увеличение количества зимних осадков, что способствует аккумуляции снега, и, наоборот, значительное уменьшение осадков в остальной период года (рисунок 7б). По обоим климатическим сценариям ожидается увеличение годовой суммы осадков на 10–20% на предгорных территориях, особенно в долинах рек Баксан и Малка (рисунок 6в).

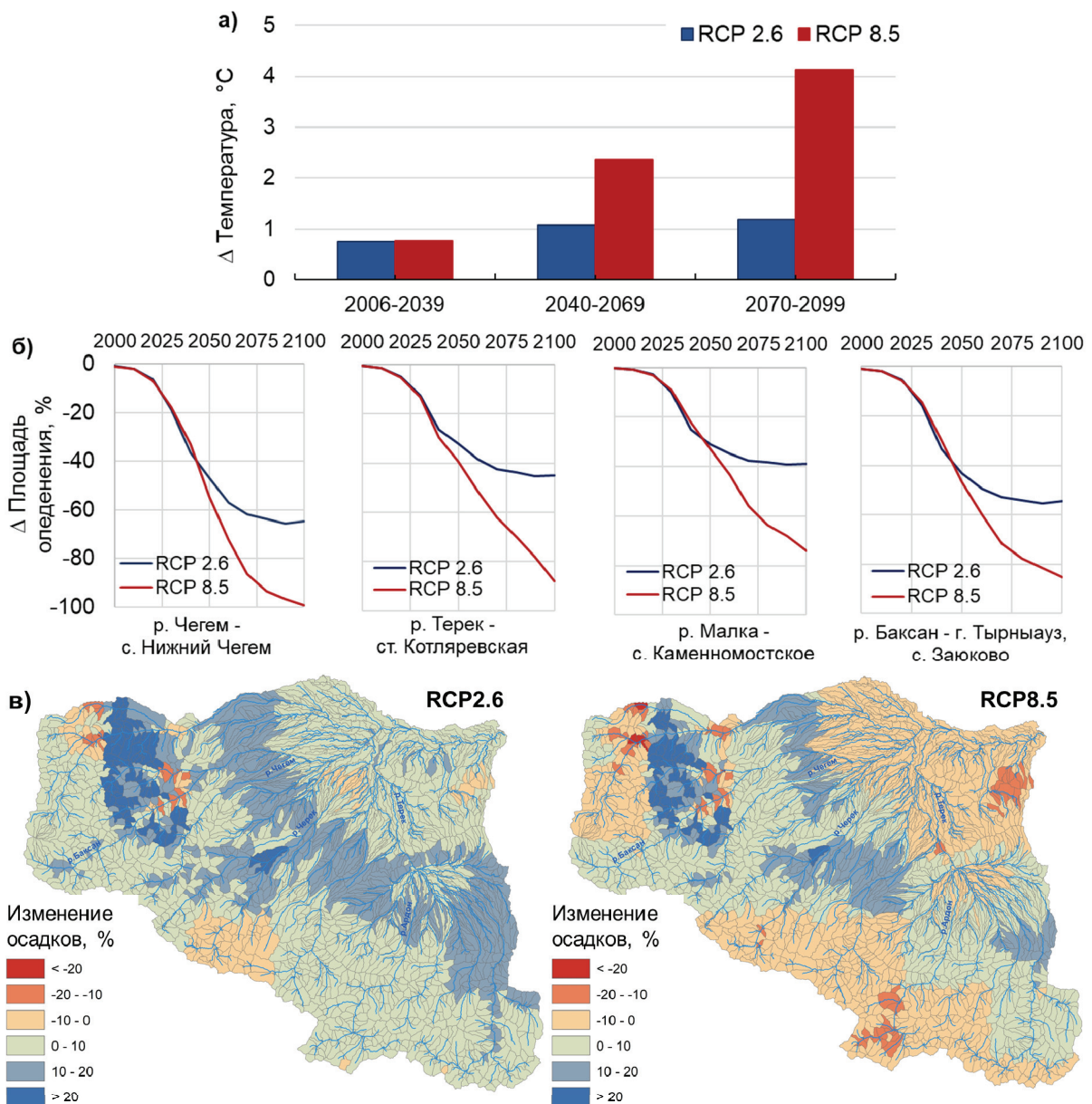


Рисунок 6 – Прогнозируемое изменение среднегодовой температуры воздуха (а), площади оледенения (б) и количества осадков (в) за 2070–2099 гг. относительно базового исторического периода (1977–2005 гг.) на территории бассейна р. Терек для двух климатических сценариев (RCP2.6 и RCP8.5)

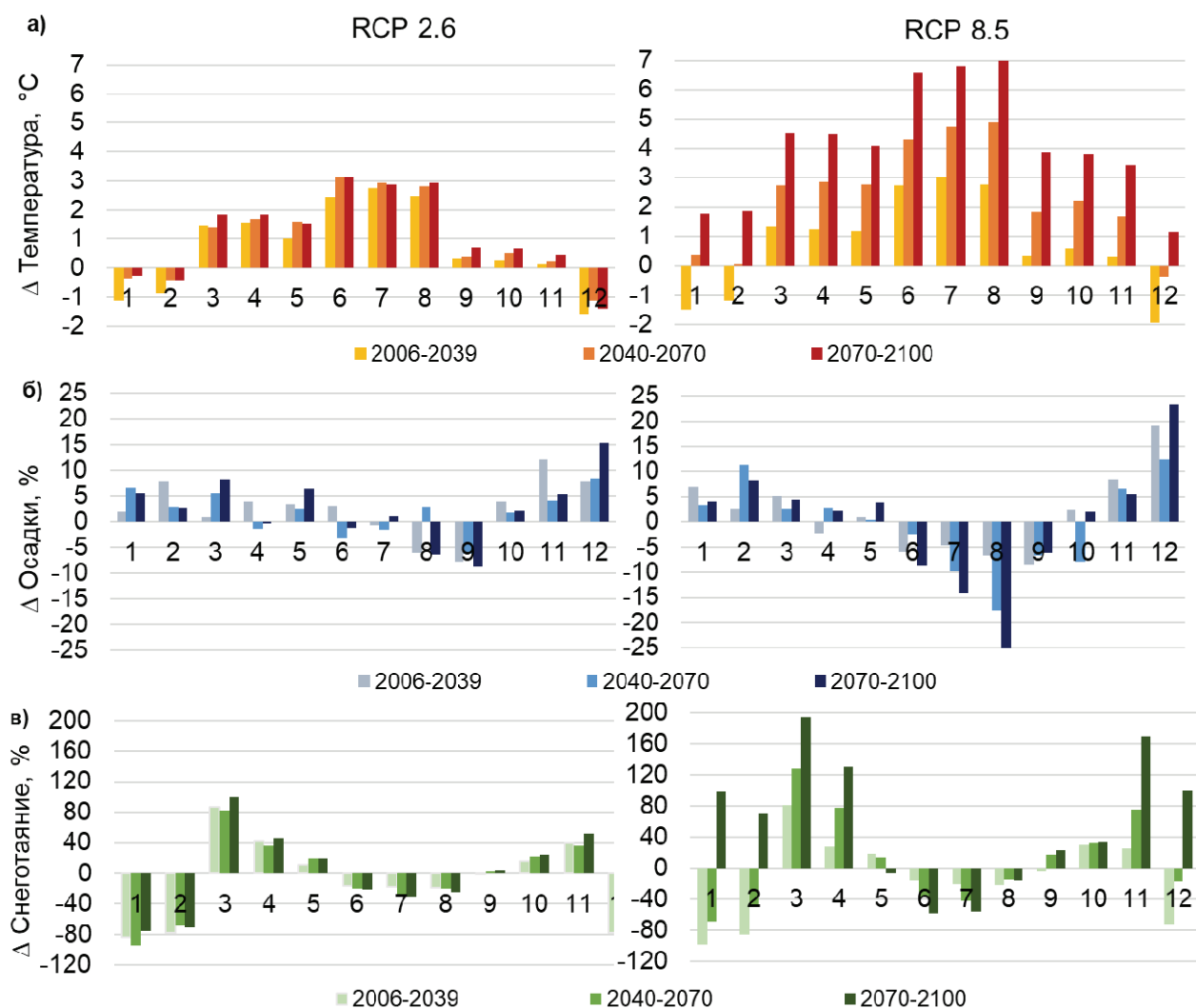


Рисунок 7 – Прогнозируемые аномалии среднемесячных температур воздуха (а), сумм осадков (б) и снеготаяния (в) на территории бассейна р. Терек для двух различных сценариев (RCP2.6 и RCP8.5) в пределах исследуемого водосбора

По результатам моделирования ожидается уменьшение снеготаяния в период с декабря по февраль и увеличение – в весенний и осенний период (рисунок 7в). В летние месяцы (с июня по август), напротив, прогнозируется уменьшение снеготаяния относительно исторического периода, что обусловлено таянием основной массы снега в весенний период. Под воздействием рассмотренных выше изменений метеорологических условий на 200–400 м увеличивается высота расположения среднемноголетней снеговой линии в высокогорной части бассейна.

Раздел 5.3 посвящен результатам моделирования изменений объемов годового стока с учетом изменения климата и оледенения в XXI в. По результатам моделирования процессов формирования стока получено, что возможно как снижение, так и увеличение годового стока в высокогорной зоне в зависимости от степени и темпов деградации оледенения, расположения зоны снегового и ледникового питания, а также фонового изменения осадков (рисунок 8, таблица 2).

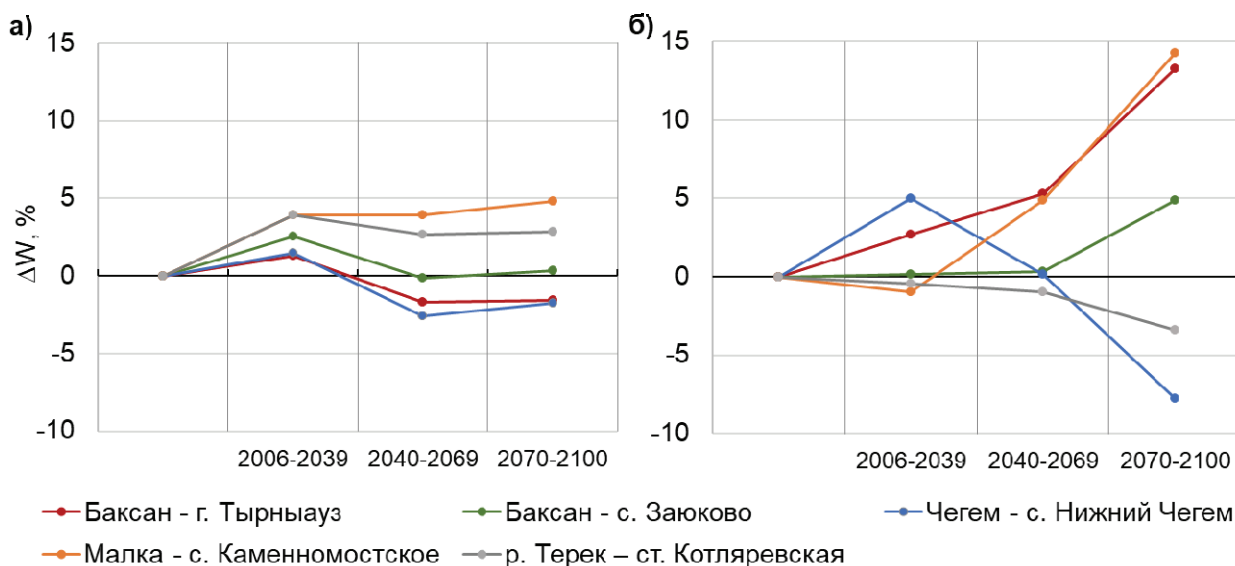


Рисунок 8 – Аномалии объемов годового стока (%) при климатических сценариях RCP 2.6 (а) и RCP 8.5 (б) относительно базового исторического периода для различных створов в высокогорной части бассейна р. Терек

Таблица 2 – Реакция стока в различных створах бассейне р. Терек на изменение факторов его формирования

Сценарий	Высотное расположение зоны снегового и ледникового питания	Суммарная доля ледникового и снегового стока	
		Высокая (более 80%)	Низкая (менее 80%)
RCP2.6	2000 < h < 5642 м	$T \uparrow E \uparrow ICE \downarrow S \uparrow P \uparrow \equiv W \downarrow$ р. Баксан – г. Тырнауз	$T \uparrow E \uparrow ICE \downarrow S \uparrow P \uparrow \equiv W \uparrow$ р. Малка – ст. Котляревская
RCP8.5	3600 < h < 5642 м Эльбрус, высокогорные территории Большого Кавказского хребта	$T \uparrow E \uparrow ICE \downarrow Sn \uparrow P \uparrow \equiv W \uparrow$ р. Баксан – г. Тырнауз	$T \uparrow E \uparrow ICE \downarrow Sn \uparrow P \uparrow \equiv W \uparrow$ р. Баксан – с. Заюково
	2000 < h < 3600 м	$T \uparrow E \uparrow ICE \downarrow Sn \downarrow P \uparrow \equiv W \downarrow$ р. Чегем – с. Нижний Чегем	$T \uparrow E \uparrow ICE \downarrow Sn \downarrow P \uparrow \equiv W \downarrow$ р. Терек – ст. Котляревская

Условные обозначения: T – температура воздуха, ICE – ледниковый сток, E – испарение, Sn – сток за счет таяния снега, P – дождевой сток, W – объем стока.

В случае реализации сценария RCP2.6 в створах рек, суммарная доля снегового и ледникового питания которых составляет более 80%, решающим фактором станет значительная деградация оледенения, которая приведет к снижению как ледникового,

так и общего стока (р. Баксан – г. Тырныауз, р. Чегем – с. Нижний Чегем). Если доля ледникового и снегового стока не столь значительна, то определяющим фактором становится увеличение количества осадков, которое приведет к незначительному увеличению годового стока (р. Баксан – с. Заюково, р. Терек – ст. Котляревская, р. Малка – ст. Каменноостское).

В сценарии RCP8.5 на сток будет значительно влиять высотное расположение зоны ледникового и снегового питания, так как при реализации данного сценария на территориях выше 3600 м оледенение к концу века еще остается, а снег в зимний период продолжает интенсивно накапливаться. Соответственно, в створах рек, зона снегового и ледникового питания которых находится в пределах Казбека и Эльбруса или в высокогорных районах Большого Кавказского хребта с высотой более 3600 м, общий объем стока будет возрастать в связи с увеличением водоотдачи из снежного покрова (р. Баксан – г. Тырныауз, р. Баксан – с. Заюково, р. Малка – с. Каменноостское). Наибольшее увеличение стока в сценарии RCP8.5 к концу XXI в. по результатам модельных оценок ожидается в створах р. Малка – с. Каменноостское (14%) и Баксан – г. Тырныауз (13%). На расположенном ниже по течению створе р. Баксан – с. Заюково в сценарии RCP8.5 увеличение стока составит 5%.

Однако если зона снегового и ледникового питания расположена ниже, объем стока в связи со снижением снегового и ледникового стока будет уменьшаться, например, для р. Чегем – с. Нижний Чегем снижение годового стока может составить до 10%. В створах, расположенных в низкогорьях и на равнинных территориях, дополнительное влияние на уменьшение объемов стока будет также оказывать увеличение испарения (р. Терек – ст. Котляревская).

Пространственное распределение аномалий слоя годового стока за 2070–2099 гг. относительно базового исторического периода также демонстрирует, что наиболее значительные положительные аномалии ожидаются в высокогорных зонах (рисунок 9), особенно в пределах гор Эльбрус и Казбек, что обусловлено увеличением водоотдачи из снега. В пределах предгорной части бассейна поля аномалий слоя стока отличаются «пестротой», которая в основном связана с входным полем осадков, отличающимся пространственной неравномерностью. Однако можно заметить, что при сценарии RCP8.5 значительно возрастает площадь территорий с ожидаемыми отрицательными аномалиями годового слоя стока, включая подбассейны на выходе р. Терек на равнину, являющиеся зоной интенсивного сельскохозяйственного освоения.

Близкая связь между высотным расположением удельных водосборов и реакцией стока с них на изменения климата и деградацию оледенения внутри Терского бассейна позволила выполнить его районирование по высотным зонам на основе выделения четырех районов (рисунок 9, таблица 3).

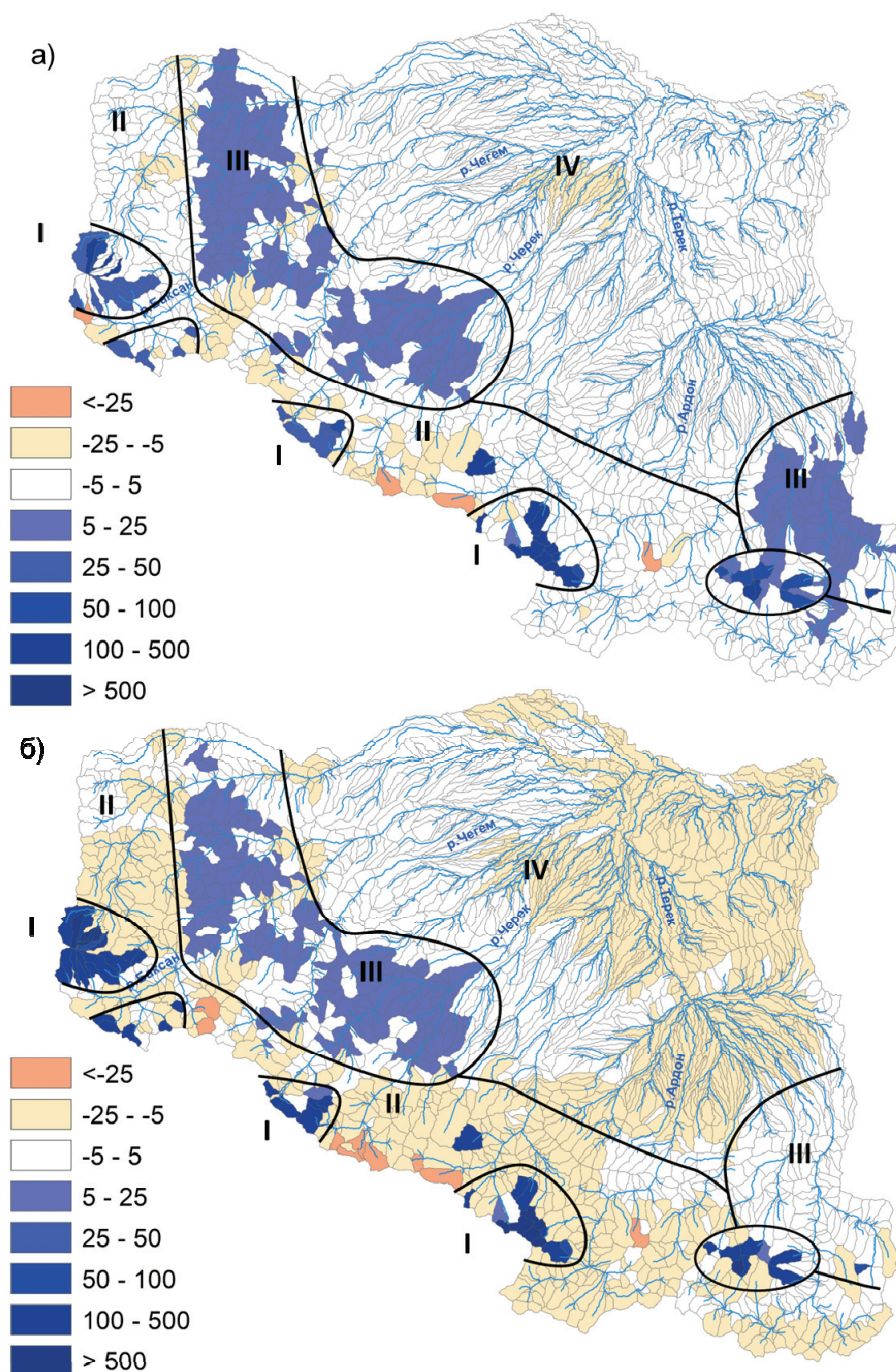


Рисунок 9 – Аномалии слоя годового стока (%) при климатических сценариях RCP2.6 (а) и RCP8.5 (б) относительно базового исторического периода для элементарных водосборов в высокогорной части бассейна р. Терек

В районе I (высокогорные территории с высотой от 3600 до 5642 м) в результате значительного увеличения водоотдачи при таянии снега и льда ожидается увеличение стока. В районе II с высотами от 2000 до 3600 м водоотдача из снежного покрова будет не столь значительно повышаться, однако существенная деградация оледенения и сопутствующее снижение ледникового стока приведет к снижению стока с удельных водосборов. В пределах водосборов, расположенных в среднегорье на высотах от 1000 до 2000 м (район III), ожидается значительное увеличение

количества осадков и, соответственно, дождевого стока, что приведет к увеличению стока воды с водосборов. В низкогорьях и на равнинных территориях (район IV) ожидается значительное увеличение испарения, поэтому даже на фоне увеличения осадков сток с удельных водосборов будет снижаться.

Таблица 3 – Реакция стока с удельных водосборов на изменения климата и деградацию оледенения

№	Высотная зона	Реакция стока
I	Высокогорье ($3600 < h < 5642$ м)	Значительное увеличение водоотдачи из снежного покрова => сток ↑
II	Высокогорье ($2000 < h < 3600$ м)	Незначительное увеличение снегового и дождевого стока, существенная деградация оледенения => сток ↓
III	Среднегорье ($1000 < h < 2000$ м)	Увеличение дождевого стока => сток ↑
IV	Низкогорье и равнина ($h < 1000$ м)	Увеличение испарения => сток ↓

В разделе 5.4 приведены результаты моделирования изменений внутригодового распределения стока с учетом изменения климата и оледенения в XXI в.

В сценарии RCP2.6 на всех исследуемых створах ожидается трансформация гидрографа со сдвигом начала половодья на более ранние строки и снижение расходов воды в июне, июле и августе (рисунок 10). Для большинства створов также ожидается снижение максимального среднемесячного расхода. Исключением является створ р. Малка – с. Каменноостское, где ожидается последовательное увеличение максимума расхода воды вплоть до последней трети XXI в., что объясняется расположением зоны питания на склонах Эльбруса и меньшей степенью деградацией оледенения в пределах водосбора.

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

Наибольшие относительные изменения месячных объемов стока ожидаются в конце столетия при сценарии RCP8.5 в весенние и в осенние периоды, что соответствует максимальным изменениям количества осадков, температуры воздуха и

объема снеготаяния. Например, увеличение среднемесячных расходов воды составит 80–210% в апреле–мае и октябре–ноябре в створе р. Баксан – г. Тырнауз (рисунок 10а) и 90–150% в марте–апреле и ноябре в створе р. Чегем – с. Нижний Чегем (рисунок 10б). В то же время сток в летний период в среднем уменьшится – на 5–15% в высокогорных створах рек Баксан и Малка, и до 40% в створах р. Чегем – с. Нижний Чегем и р. Терек – ст. Котляревская, в бассейнах которых ожидается наибольшее сокращение площади оледенения, являющееся причиной наибольших изменений летнего стока в сценарии RCP8.5.

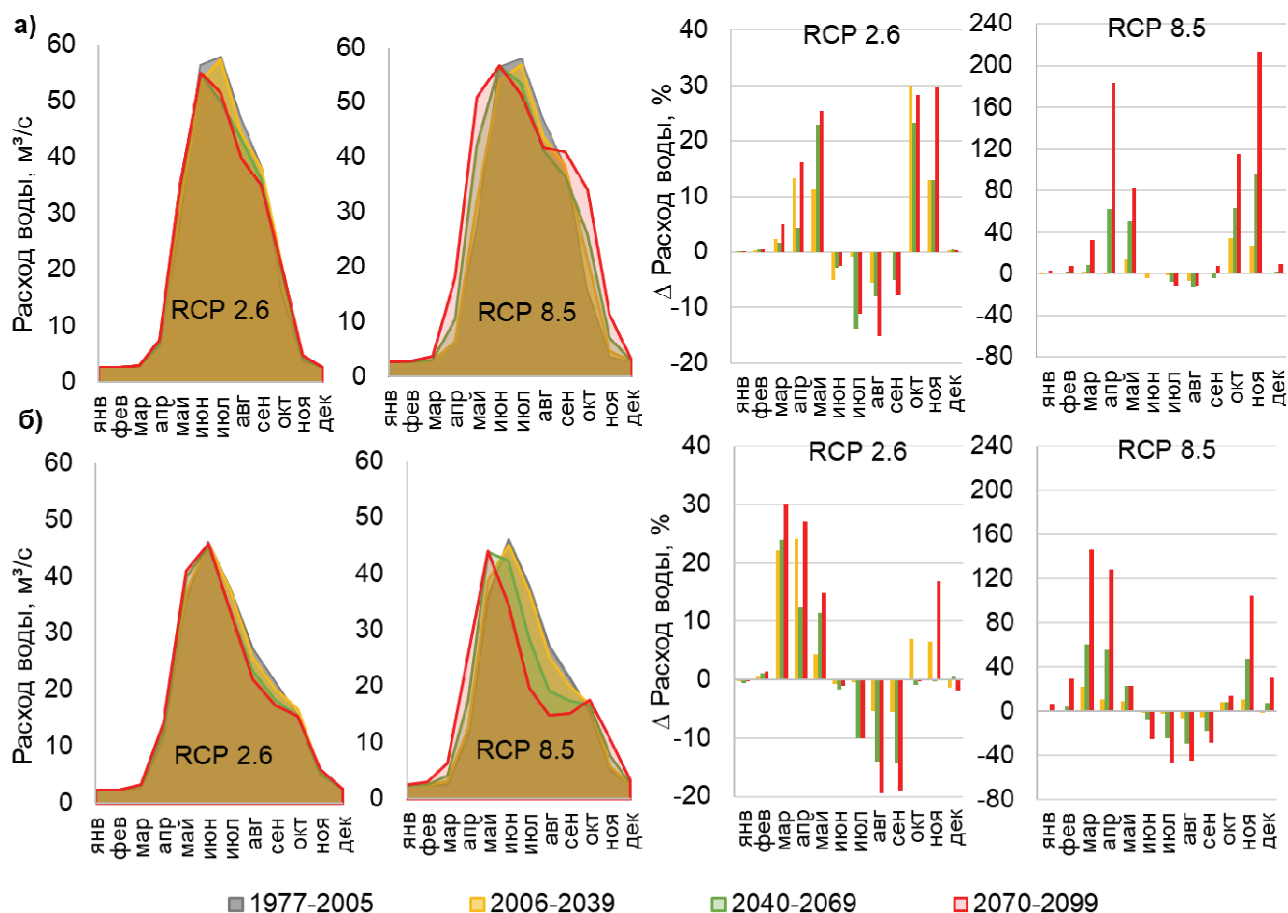


Рисунок 10 – Трансформация внутригодового распределения стока и его аномалии в створе р. Баксан – г. Тырнауз (а) и р. Чегем – с. Нижний Чегем (б) в сценариях RCP2.6 и RCP8.5.

На фоне повышения температуры воздуха доля ледникового стока повсеместно снижается, начало периода водоотдачи из снежного покрова сдвигается на более ранние месяцы, особенно при реализации «жесткого» сценария, поэтому доля снегового стока в весенний период растет. В летний период ожидается снижение вклада снегового стока в связи со сдвигом основной волны половодья на весенний период и увеличение доли дождевого стока. В осенний период в створах рек, зона снегового питания которых расположена на склонах Эльбруса, будет продолжаться таяние вечных снегов (р. Баксан – г. Тырнауз) и вклад снегового питания продолжит

расти. При этом в подбассейнах, где зона снегового питания расположена ниже (р. Чегем – с. Нижний Чегем), в осенний период снизится доля снегового стока и, наоборот, увеличится доля дождевого стока.

В целом, модельные оценки на период климатического прогноза подтверждают современные тенденции в изменениях внутригодового распределения стока – сдвиг начала половодья на более ранние сроки, уменьшение объемов стока в летний период и их увеличение в осенние месяцы. Данные изменения могут привести к нехватке водных ресурсов в летние месяцы. Рост дождевых осадков в осенние месяцы может быть триггером для экстремальных событий в горах, таких как прорывные паводки и сели, что ведет к росту опасности затопления речных долин в осенний период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении перечислены основные результаты проведенного исследования и сформулированы следующие выводы.

1. Согласно анализу современной гидрометеорологической информации, в пределах высокогорной части бассейна р. Терек наблюдается повсеместное увеличение среднегодовой температуры воздуха с интенсивностью до $1^{\circ}\text{C}/10$ лет за период 1977–2014 гг., что приводит к усилению дегляциации. Статистически значимых трендов изменения годовой суммы осадков по данным метеорологических станций не обнаружено, однако в среднем наблюдаются положительные тенденции с интенсивностью $5\%/10$ лет.

2. По результатам анализа динамики и изменений стока, среднегодовые расходы воды за 1970–2018 гг. увеличиваются с интенсивностью $2\text{--}7\%/10$ лет. Для максимальных годовых расходов, наоборот, в большинстве случаев характерна отрицательная тенденция с интенсивностью $2\text{--}10\%/10$ лет. Происходит внутригодовое перераспределение стока – тенденция смещения дат прохождения максимальных расходов воды на более ранние сроки.

3. Обширные исследования по оценке возможностей учета в ИМК ЕСОМАГ особенностей высокогорных территорий показали, что адаптированная для высокогорной части бассейна р. Терек модель формирования стока ЕСОМАГ при подключении модифицированного ледникового блока позволяет удовлетворительно описывать механизмы формирования стока в бассейне с высокой долей оледенения. В связи со значительными различиями между альбедо поверхностей снега и льда, был введен параметр, учитывающий коэффициент таяния льда (до модификации применялся единый для льда и снега коэффициент таяния). Помимо калибровки и валидации модели по данным о расходах воды, проведена валидация модели по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS о покрытости водосбора снегом, по данным масс-балансовых исследований опорных ледников Центрального Кавказа (Джанкуат и Гарабаши), а также на основе результатов изотопного анализа речных вод в различных створах.

4. Продемонстрирована возможность оценки влияния прорывных паводков на сток высокогорных рек (на примере прорывного паводка из оз. Башкара 01.09.2017 г.). С целью детального исследования влияния прорывного паводка на расходы воды в различных створах в работе использовался комплекс модели формирования стока и гидродинамической модели. Выявлено, что на прорывной паводок приходится почти весь расход воды ниже по течению от озер, вклад прорывного паводка быстро снижается после впадения в р. Баксан и становится равным вкладу дождевого стока на расстоянии 40 км от места прорыва.

5. Численные эксперименты по оценке влияния различных факторов (осадки, температура, оледенение) показали, что изменение количества осадков и площади оледенения оказывают влияние на динамику летнего стока, в то время как изменение температуры воздуха – на его внутригодовое распределение.

6. 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 («жесткий») не исчерпывают все реализации будущего климата, однако позволяют оценить возможный диапазон изменений стока и механизмы его реакции на меняющиеся климатические условия. В результате моделирования изменений речного стока на период климатического прогноза с учетом климатических проекций и изменений оледенения в XXI в. получено, что ожидается снижение ледникового стока в XXI в., однако на фоне прогнозируемого роста осадков возможен как рост, так и снижение годового стока. Изменение объема стока в конкретных створах будет зависеть от доли и особенностей зоны ледникового и снегового питания, и составит от –2 до +5 % в сценарии RCP2.6 и от –8 до +14% в сценарии RCP8.5. В створах рек, зона снегового и ледникового питания которых находится в пределах Казбека и Эльбруса или в высокогорных районах Большого Кавказского хребта с высотой более 3600 м, общий объем стока будет возрастать (р. Баксан – г. Тырныауз, р. Баксан – с. Заюково, р. Малка – с. Каменномостское).

7. Выполнено районирование бассейна р. Терек по реакции стока с удельных водосборов на изменения климата: район I – высокогорье ($3600 < h < 5642$ м), значительное увеличение водоотдачи из снежного покрова, рост стока; район II – высокогорье ($2000 < h < 3600$ м), существенная деградация оледенения, снижение годового стока; район III – среднегорье ($1000 < h < 2000$ м), увеличение дождевого стока, рост годового стока, район IV – низкогорье и равнина ($h < 1000$ м), увеличение испарения, снижение стока.

8. Модельные оценки подтверждают современные тенденции в изменениях внутригодового распределения стока – сдвиг начала половодья на более ранние

сроки, уменьшение объемов стока в летний период и их увеличение в осенние месяцы. Данные изменения могут привести к нехватке водных ресурсов в летние месяцы и к возрастанию опасности затопления территорий в осенний период.

Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность использования предложенного комплекса моделей для оценки изменения стока высокогорных территорий. Разработанные прогностические оценки позволяют заблаговременно разработать систему мероприятий по управлению водными ресурсами в регионе, дают возможность повышения эффективности эксплуатации многих сооружений и предотвращения ущерба населению и хозяйственным объектам до конца XXI в.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных в п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова:

1. **Kornilova E.D.** Djankuat glacier station in the North Caucasus, Russia: a database of glaciological, hydrological, and meteorological observations and stable isotope sampling results during 2007–2017 / Rets E.P., Popovnin V.V., Toropov P.A., Smirnov A.M., Tokarev I.V., Chizhova J.N., Budantseva N.A., Vasil'chuk Y.K., Kireeva M.B., Ekaykin A.A., Veres A.N., Aleynikov A.A., Frolova N.L., Tsyplenkov A.S., Poliukhov A.A., Chalov S.R., Aleshina M.A., Kornilova E.D. // *Earth System Science Data*. 2019. V. 11. № 3. P. 1463–1481. 2,19 п.л. SJR = 4.24, доля участия 20%.

2. **Kornilova E.D.** Modeling of extreme hydrological events in the Baksan River Basin, the Central Caucasus, Russia / Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Y.G., Bogachenko E.M., Krylenko I.V., Petrakov D.A. // *Hydrology*. 2021. V. 8. № 1, 24. P. 1–24. 2,77 п.л. SJR = 0.54, доля участия 40%.

3. **Корнилова Е.Д.** Моделирование водного режима рек с высокой долей ледникового питания (на примере бассейна р. Баксан) / Корнилова Е.Д., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Мотовилов Ю.Г., Атабиева Ф.А., Кучменова И.И. // *Водные ресурсы*. 2023. Т. 50. № 4. С. 477–484. *Переводная версия: Kornilova E.D.* Simulating runoff regime in a glaciated high-mountainous basin: A case study of the Baksan River (Caucasus, Russia) / Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Y.G., Atabieva F.A., Kuchmenova I.I. // *Water Resources*. 2023. V. 50. № 4. P. 569–576. 0,92 п.л. JIF = 1.00, доля участия 50%.

Публикации в прочих рецензируемых научных изданиях и сборниках конференций:

4. **Корнилова Е.Д.** Моделирование экстремальных гидрологических событий в бассейне р. Баксан / Корнилова Е.Д., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Богаченко Е.М. //

Сборник докладов Международной научной конференции «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению». Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2020. С. 296–301. 0,69 п.л. ИФ = 0, доля участия 50%.

5. **Kornilova E.** Modeling impact of GLOF on the Baksan River runoff (the Central Caucasus, Russia) / Kornilova E., Krylenko I., Rets E., Motovilov Y., Bogachenko E., Krylenko I., Petrakov D. // European Geosciences Union General Assembly 2021. Germany: Copernicus GmbH on behalf of the European Geosciences Union, 2021. P. 7765. 0,12 п.л. ИФ = 0, доля участия 40%.

6. **Kornilova E.** Runoff modeling in the high-mountain river basin: A case study of the terek river (Caucasus, Russia) / Kornilova E., Krylenko I., Rets E., Motovilov Y. // European Geosciences Union General Assembly 2022. Germany: Copernicus GmbH on behalf of the European Geosciences Union, 2022. P. 10333. 0,12 п.л. ИФ = 0, доля участия 50%.

7. **Корнилова Е.Д.** Водный режим рек с высокой долей ледникового питания в условиях меняющегося климата (на примере высокогорной части бассейна р. Терек) / Корнилова Е.Д., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Мотовилов Ю.Г., Корнева И.А., Постникова Т.Н., Рыбак О.О. // Сборник докладов Международной научной конференции «Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен». Санкт-Петербург: Изд-во ВВМ, 2023. С. 239–244. 0,69 п.л. ИФ = 0, доля участия 40%.

8. **Корнилова Е.Д.** Использование тяжелых изотопов кислорода и водорода в качестве естественных трассеров для определения доли талого стока в бассейне горной реки / Хомякова В.А., Рец Е.П., Корнилова Е.Д., Козачек А.В., Екайкин А.А. // Сборник докладов Международной научной конференции «Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен». Санкт-Петербург: Изд-во ВВМ, 2023. С. 603–608. 0,69 п.л. ИФ = 0, доля участия 20%.