

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
кандидат географических наук
Крыленко Инна Николаевна

Москва – 2024

Содержание

Введение	4
Глава 1. Современные условия формирования стока в высокогорной части бассейна р. Терек	11
1.1. <i>Общее описание исследуемого бассейна</i>	11
1.2. <i>Климатические условия</i>	15
1.3. <i>Особенности современного оледенения</i>	20
1.4. <i>Речной сток высокогорной части бассейна р. Терек</i>	24
1.5. <i>Обобщение</i>	30
Глава 2. Адаптация модели формирования стока ЕСОМАГ для высокогорной части бассейна р. Терек	32
2.1. <i>Обзор существующих моделей</i>	32
2.2. <i>Информационно-моделирующий комплекс ЕСОМАГ: описание структуры и требований к исходным данным</i>	35
2.3. <i>Создание баз исходной информации для модели формирования речного стока в бассейне р. Терек</i>	39
2.4. <i>Построение речной сети и схематизация бассейна р. Терек с учетом оледенения</i>	42
2.5. <i>Модификация ледникового блока ИМК ЕСОМАГ</i>	45
2.6. <i>Калибровка и валидация модели ЕСОМАГ при расчетах по данным сетевых метеорологических наблюдений на основе данных о расходах воды</i>	47
2.7. <i>Обобщение</i>	54
Глава 3. Оценка возможностей учета в ИМК ЕСОМАГ особенностей высокогорных территорий	55
3.1. <i>Валидация модели по спутниковым данным о покрытости водосбора снегом</i>	55
3.2. <i>Валидация модели на основе данных об абляции опорных ледников</i>	57
3.3. <i>Валидация модели на основе данных изотопного анализа</i>	58
3.4. <i>Моделирование стока с учетом прорывных паводков (на примере прорывного паводка из оз. Башкара 01.09.2017 г.)</i>	61
3.5. <i>Обобщение</i>	67
Глава 4. Численные эксперименты по оценке чувствительности характеристик водного режима к изменению входных условий	69
4.1. <i>Структура экспериментов</i>	69
4.2. <i>Оценка чувствительности характеристик стока к изменению площади оледенения</i>	69

4.3. Оценка чувствительности характеристик стока к изменению количества осадков	72
4.4. Оценка чувствительности характеристик стока к изменению температуры воздуха.....	73
4.5. Обобщение.....	75
Глава 5. Оценка возможных изменений стока высокогорной части бассейна р. Терек по модели ECOMAG при расчетах на основе данных гляциологической и климатических моделей	76
5.1. Разработка схемы усвоения моделью ECOMAG данных из климатической и гляциологической модели.....	76
5.1.1. Усвоение данных климатического моделирования	76
5.1.2. Усвоение данных гляциологической модели	80
5.2. Возможные изменения факторов формирования стока в бассейне р. Терек в XXI в. при различных климатических сценариях	83
5.2.1. Приземная температура воздуха	83
5.2.2. Осадки.....	83
5.2.3. Испарение	87
5.2.4. Снеготаяние	89
5.2.5. Оледенение	91
5.3. Результаты моделирования изменений объемов годового стока с учетом изменения климата и оледенения в XXI в.	92
5.4. Результаты моделирования изменений внутригодового распределения стока с учетом изменения климата и оледенения в XXI в.	100
5.5. Обобщение.....	107
Заключение	109
Список литературы.....	112

Введение

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 [Petraikov 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**:

- провести анализ фактических метеорологических и гидрологических данных, выявить текущие тенденции изменений различных характеристик стока и метеорологических факторов;
- создать информационную основу для моделирования;
- адаптировать, откалибровать, провести валидацию модели формирования стока;
- провести численные эксперименты по оценке чувствительности характеристик водного режима к изменению входных условий;
- разработать схемы усвоения моделью формирования стока данных из климатической и гляциологической модели;
- выполнить сценарные расчеты изменения стока и его генетических составляющих на основе модели формирования стока и данных гляциологического и климатического моделирования;

- 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 по 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 составяющим 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.

Статья «Modeling of extreme hydrological events in the Baksan River basin, the Central Caucasus, Russia» [Kornilova et al., 2021] содержит описание разработанной и демонстрируемой в диссертации методики оценки влияния прорывных паводков на сток рек высокогорных регионов путем синтеза модели формирования стока ECOMAG и гидродинамической модели STREAM_2D. В статье «Моделирование водного режима рек с высокой долей ледникового питания (на примере бассейна р. Баксан)» [Корнилова и др., 2023] приведены результаты численных экспериментов по оценке чувствительности характеристик водного режима к изменению оледенения. Статья «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 et al, 2019] посвящена результатам мониторинговых наблюдений на гляциологической станции географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Джанкуат, которые впоследствии использовались в диссертационной работе. Автор принимала участие в измерениях, обработке данных, а также подготовила иллюстративные материалы.

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.

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

1.1. Общее описание исследуемого бассейна

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 г. Зилга-Хох. Протекает по территориям Грузии, Северной Осетии, Кабардино-Балкарии, Ставропольского края, Чечни и Дагестана. Впадает в Аграханский залив Каспийского моря, образуя дельту площадью около 5000 км². На западе бассейн р. Терек граничит с бассейном р. Кубань, на востоке – с бассейном р. Сулак, на юге граница проходит по Главному, Боковому и Южному Боковому хребтам. Замыкающим створом для высокогорной части бассейна р. Терек, включающей такие крупные реки, как Баксан, Чегем, Малка, Черек и Ардон (рис. 1.1), является створ гидрологического поста р. Терек – г. Моздок (площадь водосбора 20600 км²), однако наблюдения за стоком воды прекращены в данном створе в 1980-х годах прошлого столетия.

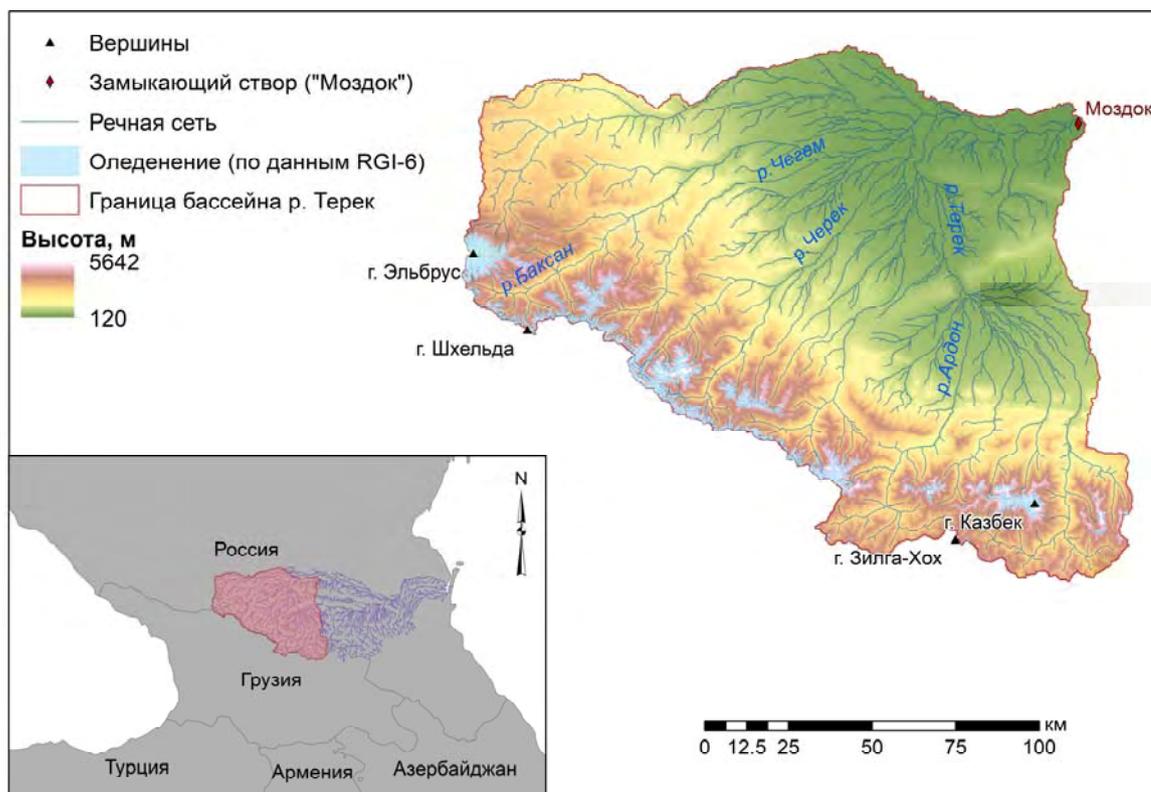


Рисунок 1.1 – Расположение и рельеф исследуемой высокогорной части бассейна р. Терек

Средняя высота бассейна до г.п. Моздок составляет 1700 м, из которых 34% приходится на высокогорную часть с высотами более 2000 м (рис. 1.2). К югу от Главного

Кавказского Хребта находится Закавказское нагорье, к северу – Боковой хребет, увенчанный высочайшей точкой Кавказа – вулканом Эльбрус, высота которого 5642 м. С Главным Хребтом Боковой соединяется короткими отрогами, которые являются водоразделами или ледоразделами между верховьями соседних рек или ледников. Высота отрогов несколько ниже Главного и Бокового хребтов, но во многих случаях она достигает 4000 м. В большинстве случаев отроги имеют тектонико-эрозионное происхождение. Осевые хребты сложены древними кристаллическими породами – гнейсами, кристаллическими сланцами, прорывающими их светло-серыми гранитами; в разделяющем их продольном понижении важную роль играют глинистые сланцы. На Главном и Боковом хребтах, в особенности в районе Центрального Кавказа широко распространены вершины альпийского типа, увенчанные остроконечными карлингами. Такие формы рельефа отвечают относительной молодости хребтов Кавказа. Именно эти два хребта и перемычки между ними являются областью развития современного горного оледенения Центрального Кавказа. В связи с этим возникли характерные ледниковые формы рельефа – троговые долины, цирки, кары, моренные отложения [Авессаломова и др., 2002].

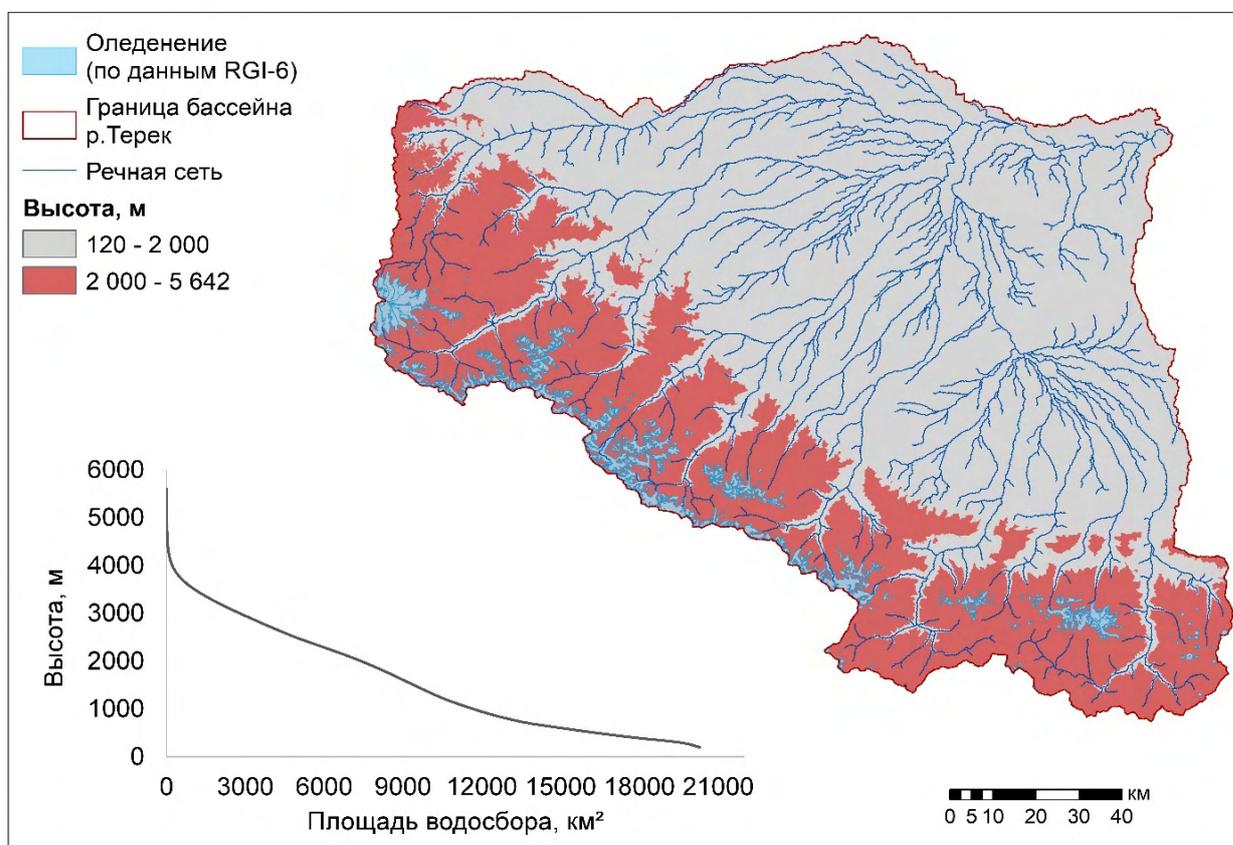


Рисунок 1.2 – Гипсографическая кривая и расположение высокогорной территории (>2000 м) бассейна р. Терек (до замыкающего створа «Моздок»)

Северный склон Большого Кавказа на этом участке спускается к слабо наклонной аллювиальной предгорной равнине с абсолютными высотами 500-550 м и представлен серией куэстовых гряд: Скалистый хребет (до 3646, г. Каракая), Пастбищный хребет (до 1541 м), Лесистый хребет (до 900 м). Все хребты имеют параллельное условно-субширотное простирание с северо-запада на юго-восток. Современных ледников здесь в настоящее время нет, но следы голоценового оледенения представлены повсеместно. Например, на Скалистом хребте отмечены моренные нагромождения и кары, особенно хорошо развитые на участке хребта между реками Чегем и Ардон.

Гидрографическая сеть Центрального Кавказа заложена по тектоническим разломам, если взглянуть на карту, сразу можно отметить почти правильный ортогональный рисунок водотоков. Долины мелких рек, собирающих сток с ледников на горной территории, также заложены по тектоническим разломам, например, долины рек Адыл-Су и Адыр-Су, правых притоков р. Баксан.

В географии распространения типов ландшафтов и почвенного покрова в исследуемом бассейне наибольшую роль играет рельеф и высотная поясность.

На равнинной части бассейна р. Терек распространены каштановые и светлокаштановые почвы. На высотах 300–1200 м в связи с увеличением атмосферных осадков наблюдается смена каштановых и светлокаштановых почв на черноземные. Выше до 1900 м в более влажных и до 2200 м в более сухих районах распространены лесные почвы, которые охватывают обширные лесные территории северных склонов Большого Кавказа [Лурье, 2002]. На высотах более 1800–2000 м, где наблюдается уменьшение температуры воздуха, что не позволяет произрастать древесной растительности, распространены горнолуговые и горные лугово-степные и горно-торфянистые почвы безлесных высокогорий. Векторизованные автором почвенная и ландшафтная карты из Атласа Кабардино-Балкарской Республики [Атлас Кабардино-Балкарской республики, 1997] и Республики Северная Осетия [Почвенная карта Северо-Осетинской АССР, 1990] представлены на рис. 1.3.

Основными типами растительности в пределах исследуемой территории являются: степная, лесостепная, лесная, субальпийская, альпийская и нивальная. В равнинной части бассейна распространены разнотравно-типчачково-ковыльные степи и полынно-злаковые пустынные степи. При увеличении высоты водосбора и количества атмосферных осадков появляется лесная растительность. На высотах от 500–600 до 1000–1200 м в нижней части горных склонов распространены дубовые леса, в средней части на высотах от 1000–1200 до 1500–1600 м – буковые леса, от 1000–1200 до 2100–2200 м — сосновые и березовые леса. Выше лесной зоны простирается субальпийская растительность до 2500–2700 м и

альпийская растительность на высоких хребтах. Верхняя граница альпийской зоны совпадает с расположением снеговой линии и с нижней границей нивальной зоны, расположенной примерно на высоте 4000 м [Лурье, 2002].

а)



б)



Рисунок 1.3 – Векторизованные ландшафтная (а) и почвенная (б) карта Кабардино-Балкарии и Северной Осетии в масштабе 1 : 750 000, красной линией обозначена граница исследуемого бассейна р. Терек

1.2. *Климатические условия*

Основные черты климата района исследования определяются, с одной стороны, его географическим положением на северном склоне Большого Кавказа, а с другой – принадлежностью к высокогорной области. Первый фактор обуславливает задержание воздушных масс, которые беспрепятственно перемещаются по обширной Русской равнине, второй – проявление влияния свободной атмосферы в особом ветровом режиме, в малом абсолютном влагосодержании воздушных масс и большой прозрачности воздуха.

Для высокогорий зоны Большого Кавказа характерно преобладание континентального воздуха умеренных широт во все сезоны года. Вторжения арктического воздуха в высотную зону выше 3000 м редки, так как вследствие своей устойчивости холодные воздушные массы имеют тенденцию к обтеканию Кавказского хребта, а не к подъему вверх. Тропический воздух также редко вторгается, но при этом значительно чаще поднимается до больших высот. На процессы общей циркуляции накладывается также влияние местных ветров – горно-долинных и ледниковых, получающих наибольшее развитие в теплую половину года [Волошина, 2001].

Для равнинной части бассейна р. Терек характерна континентальность климата: очень сухое и жаркое лето, значительные морозы зимой, весна и осень непродолжительны. Средняя температура в январе варьируется от -4 до -8°C , в июле – от 23 до 26°C . Абсолютные минимумы зимой колеблются от -30 до -40° ; абсолютный максимум температуры воздуха летом в центральных районах достигает 45° [Ресурсы поверхностных вод СССР..., 1973]. Количество осадков на равнинной части бассейна незначительно и составляет 170–180 мм/год. В предгорьях Большого Кавказа с увеличением высоты годовая сумма осадков возрастает до 500–600 мм.

Сложный рельеф Северного Кавказа, состоящий из разновысотных хребтов и котловин с большим диапазоном высот, является основным фактором, определяющим климатические особенности высокогорной территории. Радиационный режим и циркуляция воздушных масс в разных районах Северного Кавказа существенно изменяются под влиянием рельефа. Современное оледенение и постоянный снежный покров на Главном Кавказском хребте и его отрогах также оказывают влияние на климат, особенно на высотах выше 1500–2000 м. В итоге орография, наличие оледенения и постоянного снежного покрова, а также сезонного снежного покрова в горах в течение длительного времени приводят к значительному разнообразию климатических условий на территории Северного Кавказа [Лурье и др., 2005].

В пределах исследуемого бассейна расположено 12 метеорологических станций и 15 гидрологических постов (рис. 1.4). Перечень метеорологических станций представлен в таблице 1.1.

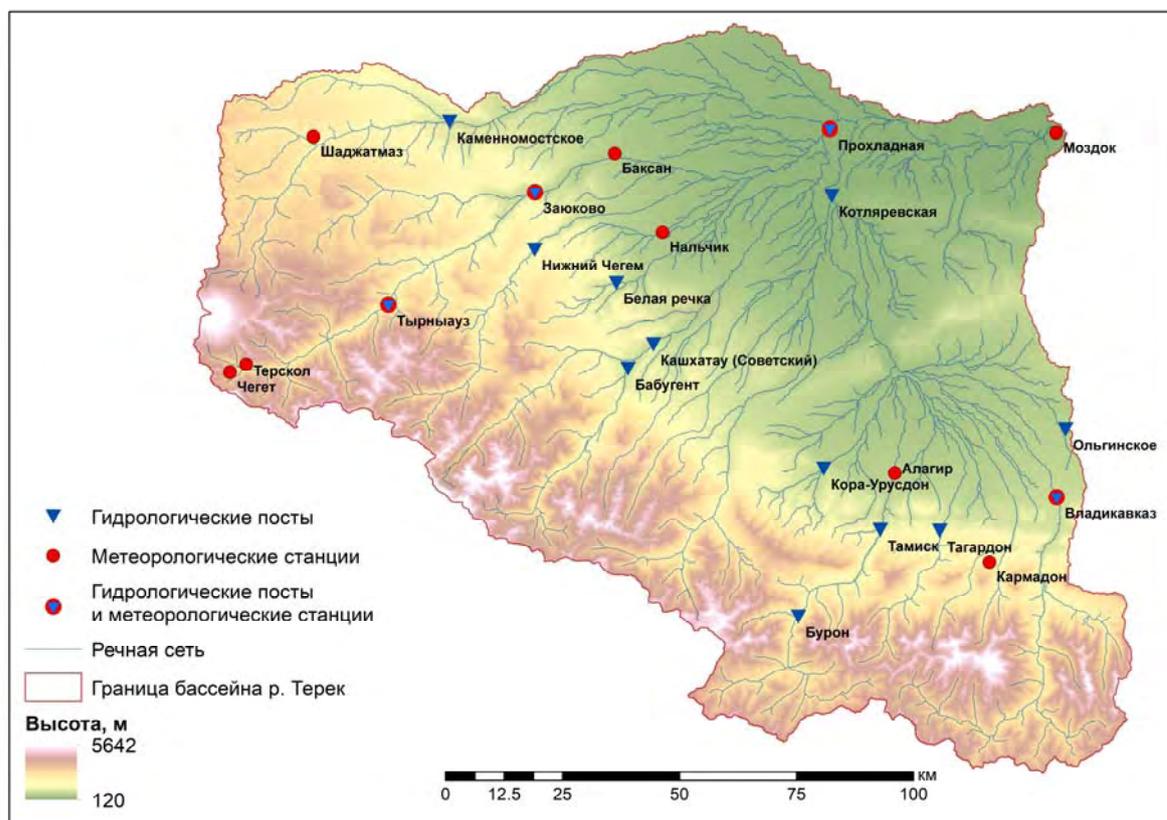


Рисунок 1.4 – Расположение метеостанций и гидрометрических постов в исследуемом бассейне р. Терек

Таблица. 1.1. Перечень метеостанций в пределах исследуемого бассейна р. Терек

Название	Высота, м	Период, за который имеются данные наблюдений
Моздок	127	1977–1994, 2002–2005, 2007–2014
Прохладная	200	1977–2014
Нальчик	420	1989–2019
Баксан	457	2004–2019
Алагир	559	1977–2014
Заюково	673	2008–2019
Владикавказ	707	1977–2014
Тырныауз	1275	2008–2019
Кармадон	1624	1977–2014
Шаджатмаз	1707	1977–2014
Терскол	2141	1977–2019
Джанкуат (действует только в период абляции)	2640	2007–2018
Чегет	3040	2000–2019

По результатам анализа фактических рядов метеорологических характеристик наблюдаются значительные градиенты среднегодовой температуры и годовой суммы осадков (рис. 1.5). В среднем по водосбору градиент температуры составляет $-0.47^{\circ}\text{C}/100$ м, годовой суммы осадков – 43 мм/100 м.

В пределах высокогорного Эльбруса среднесуточный температурный градиент вдоль южного склона в летний период составляет $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ в нижней части склона (2150–3850 м) и $0.7^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ в верхней (3850–5150 м) [Торопов и др., 2016]. Плувиометрический градиент в районе Эльбруса с высотой начинает уменьшаться. Максимум осадков отмечается в диапазоне высот 3000–4000 м и достигает на западных и южных склонах Эльбруса 2400–2600 мм/год, на северных и восточных – 1200–1300 мм. Выше 4000 м убывание водности облаков и влагосодержания атмосферы становится столь значительным, что уже не может компенсироваться орографическим эффектом, и осадки убывают. По оценочным данным, на высоте 5000–5500 м со стороны Западного плато их годовая сумма составляет около 1500 мм [Ледники и климат Эльбруса, 2020].

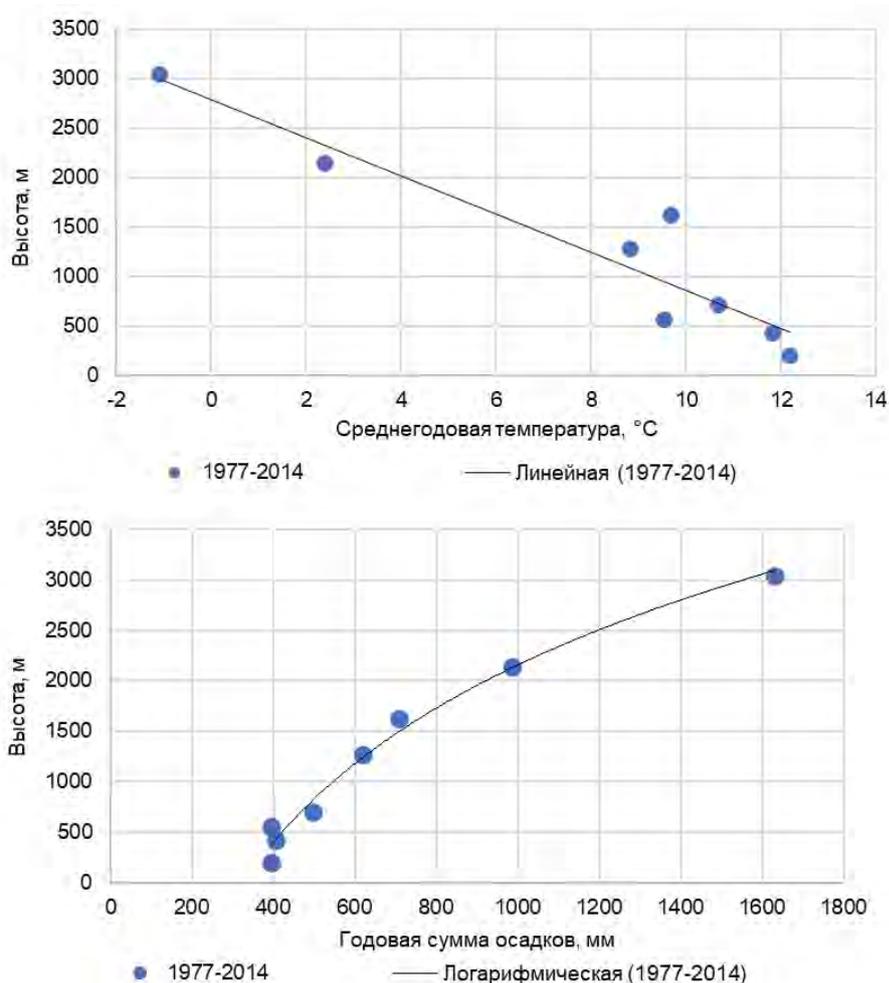


Рисунок 1.5 – Изменение среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы осадков с увеличением абсолютной высоты местности по фактическим данным метеорологических станций в бассейне реки Терек за 1977–2014 гг.

Анализ внутригодового хода осредненных за многолетний период температуры и суммы осадков за месяц по фактическим данным (рис. 1.6) также отображает влияние высоты местности. Так, например, температура воздуха в июне по данным высокогорных

метеостанций Чегет и Терскол, расположенных на высотах 3040 м и 2141 м над уровнем моря, составляет 5 и 9°C соответственно. В то время как по данным расположенных в предгорьях станций Владикавказ (707 м БС) и Прохладная (200 м БС) – 21 и 22°C, соответственно. В среднем переход температуры через 0°C наступает в марте-апреле, исключая высокогорные территории выше 3000 м, где положительные температуры могут наблюдаться только в мае. Обратный переход от положительных температур к отрицательным наблюдается в ноябре в высокогорной части бассейна и в декабре в предгорной и равнинной частях. Количество осадков также зависит от высоты местности – наибольшее количество осадков выпадает на высокогорной территории (метеостанции Чегет и Терскол) и снижается по мере убывания абсолютной высоты. Наибольшее количество осадков наблюдается в осенний и весенний период, наименьшее – в летний и зимний. Количество осадков в марте по данным высокогорной м/ст Чегет в среднем достигает 200 мм. Наименьшее количество осадков наблюдается в предгорных и равнинных частях водосбора и составляет около 20–40 мм в месяц.

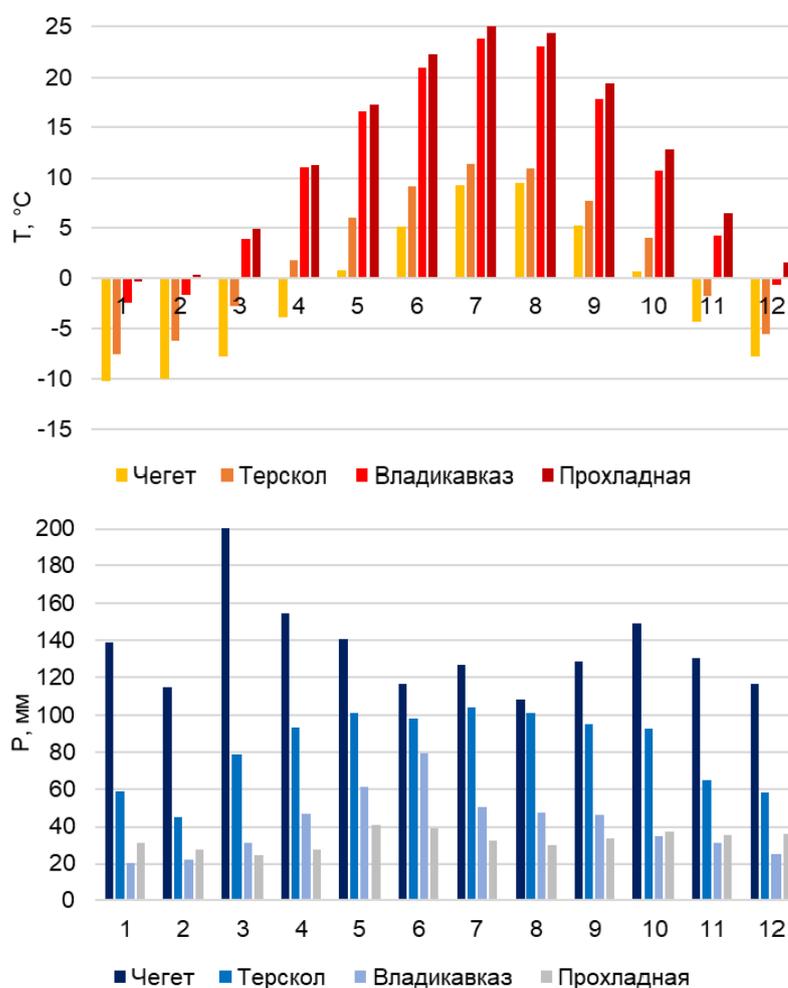


Рисунок 1.6 – Внутригодовой ход осредненных за многолетний период среднемесячных температуры (верхний график) и суммы осадков (нижний график) за месяц по фактическим данным

Для анализа динамики и изменений основных метеорологических характеристик сравнивались временные тренды среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы осадков по фактическим данным метеостанций. Проверка статистической значимости трендов исследуемых рядов выполнялась с помощью двух статистических тестов для выявления тенденций и оценки значимости тенденций: модифицированный параметрический критерий Стьюдента [Santer et al., 2000] и модифицированный непараметрический критерий Манна-Кендалла, основанный на ранжировании [Hamed, Rao, 1998]. Для выявления точки перегиба, когда наблюдались изменения метеорологических характеристик, применялся метод Петтит-теста [Pettit, 1979].

Согласно полученным результатам, в пределах высокогорной части бассейна р. Терек наблюдается повсеместное увеличение среднегодовой температуры воздуха со средней интенсивностью до $0.7^{\circ}\text{C}/10$ лет за период 1977–2014 гг. По результатам Петтит-теста изменения начались в 1997–1998 гг. При этом, главным образом, температура увеличивается именно в летние месяцы с интенсивностью $0.3\text{--}0.7^{\circ}\text{C}/10$ лет, 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 (рис. 1.7).

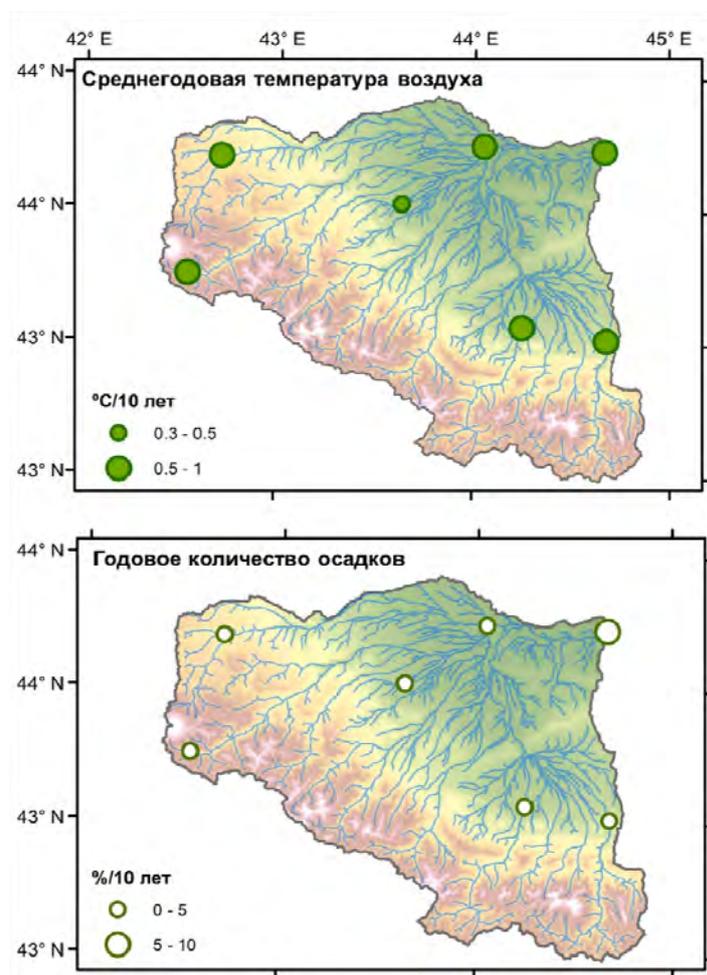


Рисунок 1.7 – Тренды изменения ($p = 0.05$) средней температуры и годовой суммы осадков по фактическим данным метеорологических станций в бассейне р. Терек (1977–2014 гг.), белые значки – отсутствие статистической значимости

Для анализа изменений внутригодового хода температур и осадков были выбраны две станции с самыми длинными рядами наблюдений – Терскол («горная») и Нальчик («равнинная»). Ряды наблюдений были разделены на два периода, согласно результатам Петтит-теста – 1977–1997 и 1998–2014 гг. (рис. 1.8). Видно, что по данным «равнинной» метеостанции Нальчик наблюдается повышение температуры воздуха ежемесячно. Однако по данным «горной» метеостанции Терскол наблюдается уменьшение температуры в зимний и увеличение в летний период, что создает условия для накопления твердых осадков зимой, но в то же время для их интенсивного таяния летом. Изменения внутригодового распределения осадков менее выражены, однако прослеживаются небольшое увеличение количества осадков в осенне-весенний и их уменьшение в летний период.

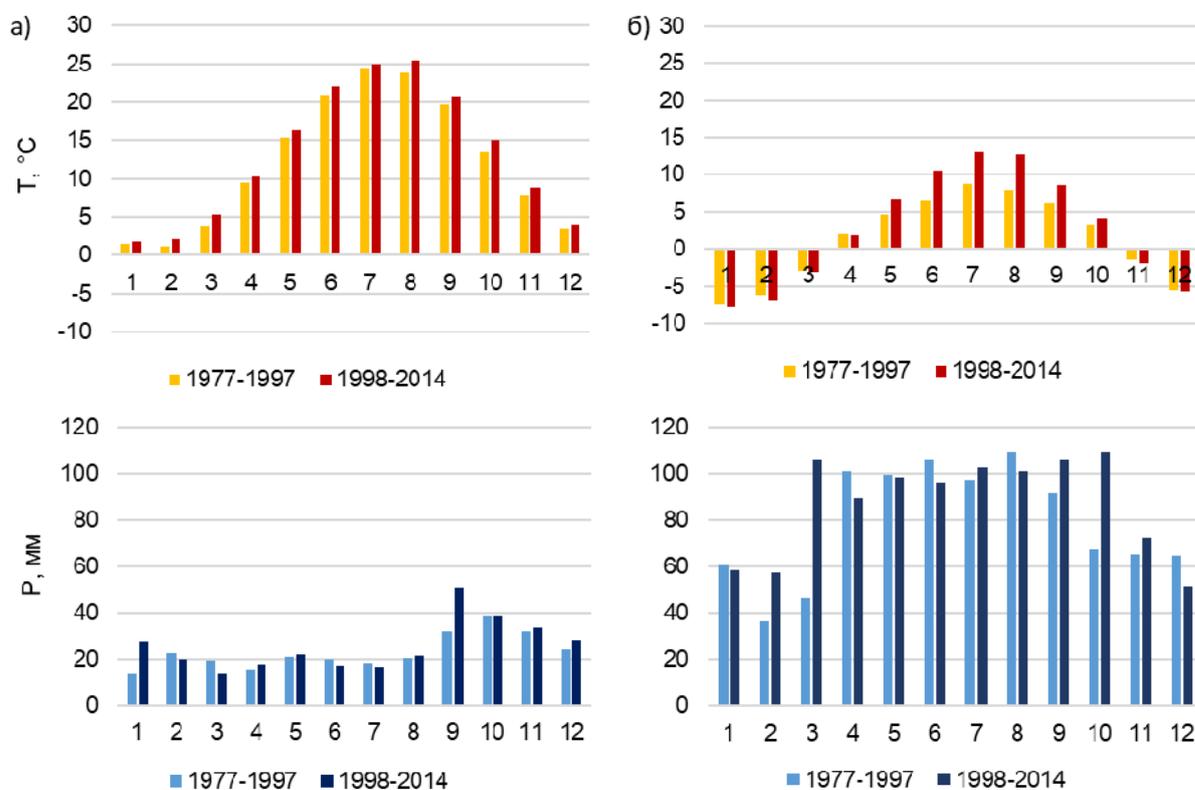


Рисунок 1.8 – Внутригодовой ход осредненных за периоды 1977–1997 гг. и 1998–2014 гг. среднемесячных температуры (верхний график) и суммы осадков (нижний график) за месяц по фактическим данным метеостанций Нальчик (а) и Терскол (б)

1.3. Особенности современного оледенения

Исследуемая высокогорная часть бассейна р. Терек расположена в пределах Центрального Кавказа, который является одним из наиболее мощных очагов оледенения Кавказа. Начиная с высоты в основном 2500 м, значительная часть территории занята многолетними снежниками, фирном и льдом. Ледники и снежники являются областью

зарождения основных речных систем, имеют большое значение в питании рек, влияя на их водность. Практически весь ледниковый сток Центрального Кавказа концентрируется в бассейне Терека. Ледники покрывают около 684 км² [RGI 6.0 Consortium, 2017] в пределах исследуемого бассейна. Около 10% общей площади оледенения занимают ледники вулканического массива Эльбруса – область наиболее обширного и мощного современного оледенения Большого Кавказа (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Фотография ледников северного склона горы Эльбрус (а) и отдельно ледника Малый Азау на южном склоне (б)

По данным Каталога ледников СССР [Ресурсы поверхностных вод СССР..., 1967] на территории бассейна находилось 323 ледника, которые занимали площадь 785 км². Среди них выделяют 11 ледников Эльбруса с общей площадью 107.8 км².

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]. По результатам исследования [Носенко и др., 2013] с 2001 по 2010 гг. ледники Центрального Кавказа сократились на 4.6%. Наименьшие потери площади произошли у ледников Эльбруса (рис. 1.10), ее суммарное изменение составило 2.8%.

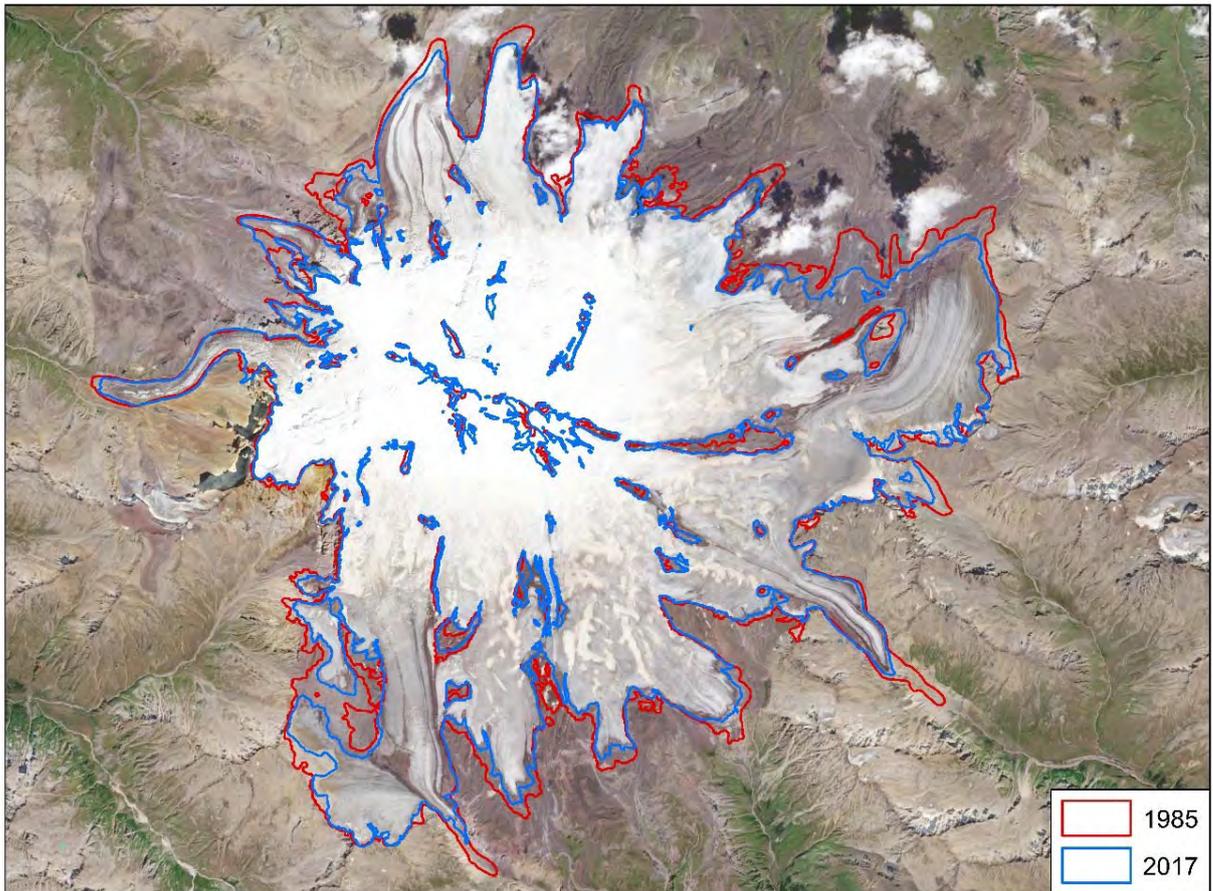


Рисунок 1.10 – Изменение площади оледенения ледниковой системы Эльбруса, снимок Sentinel-2 30.08.2022 (контуры ледников Эльбруса в 1985 и 2017 гг. предоставлены Институтом географии РАН)

В пределах исследуемого бассейна расположено два репрезентативных ледника Кавказа [Popovnin et al., 2015; Рототаева и др., 2019; Rets et al., 2019], динамика которых отображает в целом динамику всех ледников Центрального Кавказа. Ледники Джанкуат и Гарабаши, расположенные в Приэльбрусье, также являются объектами мониторинга баланса массы и входят в сеть WGMS [Zemp et al., 2021].

Один из них расположен на южном склоне горы Эльбрус – ледник Гарабаши. Ледник простирается от 4820 до 3300 м с площадью поверхности 4.05 км². Среднегодовая температура воздуха на границе питания (около 3900 м) составляет от –6 до –8°C. Второй репрезентативный ледник находится на северном склоне центральной части Главного Кавказского хребта – ледник Джанкуат. Ледник простирается от 3750 до 2700 м, его площадь составляет 1.76 км², а экспозиция направлена на северо-запад. Среднегодовая температура воздуха на границе питания (около 3200 м) составляет от –3 до –4.5°C.

Согласно данным Всемирной службы мониторинга ледников (WGMS) наблюдается уменьшение баланса массы и площади ледников, в том числе и опорных ледников Гарабаши и Джанкуат (рис. 1.11).

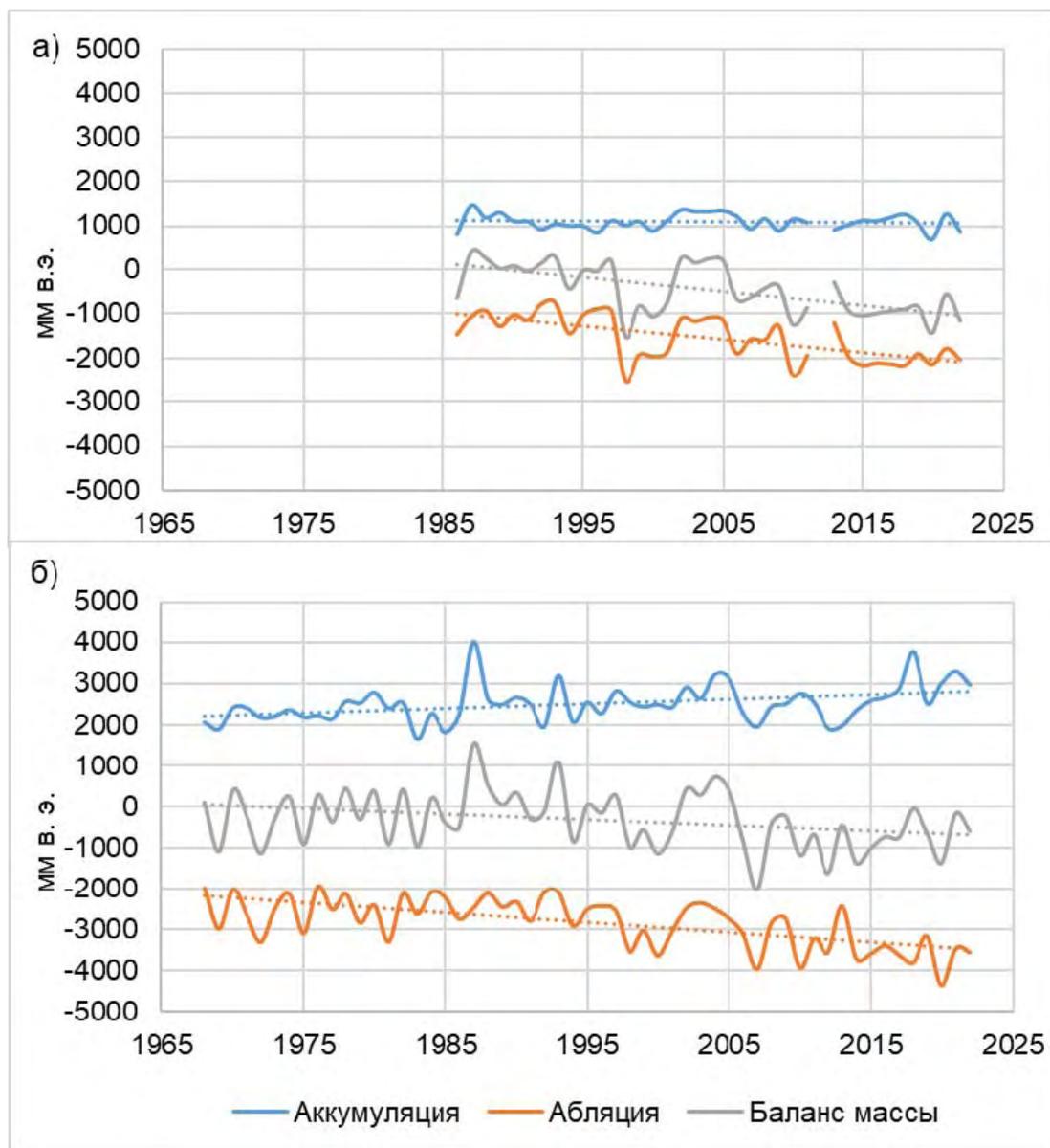


Рисунок 1.11 – Динамика аккумуляции, абляции и баланса массы ледников Гарабаши (а) и Джанкуат (б) [Popovnin et al., 2015; Рототаева и др., 2019]

На Кавказе более 13% общей площади ледников покрыто моренными отложениями [Stokes et al., 2006; Tielidze et al., 2020]. Доля площади ледников, которые покрыты мореной, неуклонно растет по мере отступления ледников [Popovnin et al., 2015; Tielidze, 2020]. Реакция горных ледников с моренными отложениями на климатические изменения неоднозначна и зависит от множества факторов [IPCC, 2013; Ferguson, Vieli, 2021], но, в целом, моренный покров оказывает существенное влияние на баланс массы ледника. Тонкие слои морены (менее 5–7 см на Кавказе, согласно исследованию [Popovnin et al., 2015]) или мелкие частицы и светопоглощающие примеси на поверхности ледника ускоряют таяние, поскольку они имеют более низкое альbedo, чем лед, и тем самым поглощают больше солнечной радиации [Benn, Lehmkuhl, 2000; Kutuzov et al., 2021].

Более толстые слои могут служить изоляционным материалом, уменьшающим таяние льда под ними [Popovnin et al., 2015; Kraaijenbrink et al., 2017; Herreid, Pellicciotti, 2020]. Распространение моренного покрова достаточной толщины потенциально может смягчить последствия изменения климата, поскольку более низкие скорости таяния замедляют потерю массы ледника по сравнению с обнаженной поверхностью льда. Согласно исследованиям [Rounce et al., 2021; Popovnin et al., 2015] в пределах Кавказского региона преобладают ледники с толстым слоем морены (толщиной более нескольких сантиметров). Вероятно, что на Северном Кавказе защитный эффект моренного покрова и уменьшение абляции могут обусловить более медленные темпы деградации оледенения при условии, что толщина и пространственная протяженность моренных отложений будут продолжать увеличиваться.

Сток рек в горных регионах в значительной степени зависит от динамики и состояния ледников. Долгосрочный прогноз эволюции горного оледенения актуален для расчетов характеристик речного стока в условиях меняющегося климата. Например, модель GloGEM была использована для прогноза изменений стока рек в различных бассейнах по всему миру [Huss, Hock, 2018]. Исследование показало, что ледниковый сток увеличивается до определенного момента, а затем начинает снижаться, так как отрицательный баланс массы ледников приводит к уменьшению объема и площади оледенения, что в конечном итоге приводит к уменьшению общего количества талой воды. Однако увеличение стока наблюдается приблизительно в половине исследованных бассейнов, в остальных бассейнах этот переломный момент уже пройден. Согласно оценкам [Huss, Hock, 2018], время наступления «точки перегиба» ледникового стока в бассейне р. Кубань, также питающейся ледниками Центрального Кавказа, был пройден в 2002 ± 7 лет в климатическом сценарии RCP2.6 и в 2003 ± 18 лет по сценарию RCP 8.5. Статистический анализ исторических данных в работе [Rets et al., 2020] приводит к выводу, что это могло произойти гораздо раньше – между 1979 и 1982 годами.

1.4. Речной сток высокогорной части бассейна р. Терек

Реки в верховьях бассейна Терека – типичные горные реки, формирующие сток на отметках выше климатической снеговой линии. Согласно классификации рек по водному режиму Б.Д. Зайкова, р. Терек относится к Северо-Кавказскому типу, который отличается низкой осенне-зимней меженью, высоким весенне-летним половодьем и паводками (рис. 1.12). Максимальные расходы воды наблюдаются в июне–августе в результате интенсивного таяния снежного покрова и ледников.

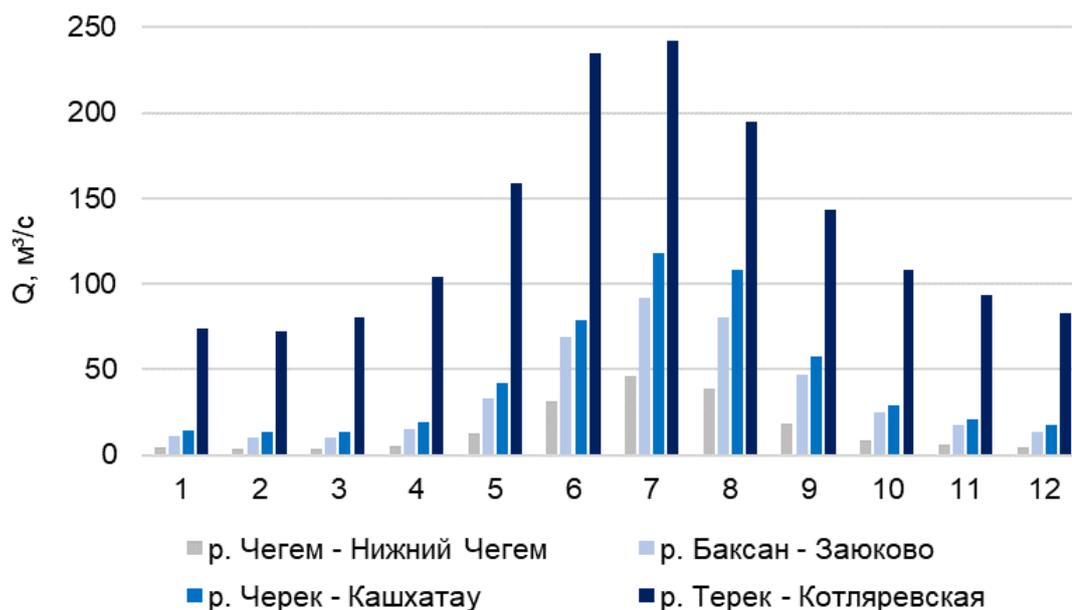


Рисунок 1.12 – Внутригодовой ход осредненных за многолетний период среднемесячных расходов воды по фактическим данным

Гидрограф рек с ледниковым питанием в летний период имеет вид ломаной линии, следующей за ходом температур. Из-за резкого внутрисуточного хода таяния расходы реки также имеют отчетливый суточный ход с минимумом утром и максимумом в вечерние часы за счет добегания талой ледниковой воды. Наступление суточных максимумов уровня запаздывает относительно максимумов образования талой воды тем больше, чем дальше от ледника расположен створ и больше регулирующая способность бассейна. Минимальные уровни изменяются плавно, что свидетельствует об отсутствии ночного таяния на леднике и полном опорожнении русловой сети от талых вод (рис. 1.13). Кроме того, тип погоды определяет тип суточного хода: при антициклональной погоде суточный паводок хорошо сформирован, имеет отчетливо выраженный пик и глубокий спад, при фронтальном типе – суточный ход, по существу, не выражен, конвективный тип по своему влиянию на сток занимает промежуточное положение. При удалении от ледников гидрограф реки становится более сглаженным с выраженным половодьем правильной формы.

Режимные наблюдения за расходами воды на гидрометрических постах в высокогорной части бассейна р. Терек начались преимущественно в 1950–1970-х гг. В данной 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 таблице 1.2.

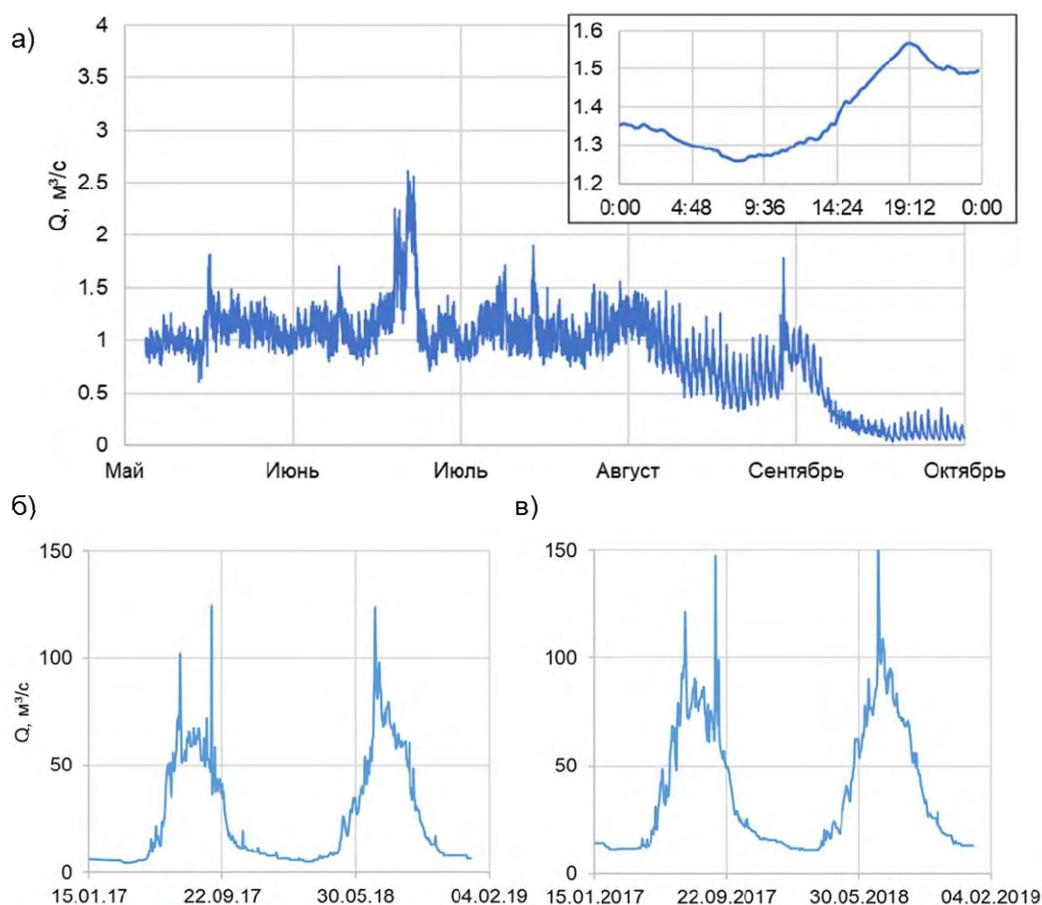


Рисунок 1.13 – Гидрограф ледниковой реки Джанкуат (а) и р. Баксан в створах г. Тырнауз (б) и п. Заюково (в)

Для анализа динамики и изменений стока в нашей работе оценивались временные тренды среднегодовых и максимальных расходов воды по фактическим данным на 15 постах за весь период наблюдений с 1970 по 2018 год включительно. Проверка статистической значимости трендов исследуемых рядов выполнялась с помощью двух статистических тестов для выявления тенденций и оценки значимости тенденций: модифицированный параметрический критерий Стьюдента [Santer et al., 2000] и модифицированный непараметрический критерий Манна–Кендалла, основанный на ранжировании [Hamed, Rao, 1998].

По результатам проведенного анализа, среднегодовые расходы воды за 1970–2018 гг. увеличиваются с интенсивностью 2–7%/10 лет. Ранее аналогичные тренды были получены и в работе [Rets et al., 2018] за период 1945–2010 гг. Наибольшие изменения годового стока наблюдаются для створов, замыкающих высокогорную часть бассейна (р. Баксан – с. Заюково, р. Малка – с. Каменноостское, р. Чегем – Нижний Чегем, р. Черек – пгт Кашхатау (Советский)) и равнинных створов. Как отмечено в [Rets, Kireeva, 2010], данные изменения могут быть связаны с общим увеличением годовой суммы осадков, наиболее ярко выраженным в равнинной и предгорной областях Северного Кавказа.

Таблица 1.2 – Основные гидрографические характеристики и характеристики стока воды высокогорный части реки Терек и ее притоков

Река	Пункт	Средний уклон реки, %	Площадь водосбора, км ²	Средняя высота водосбора, м	Средний расход воды, м ³ /с	Модуль стока, л/с·км ²	Максимальный расход воды, м ³ /с	Изменение среднегодового расхода, %/10 лет	Изменение максимального расхода, %/10 лет	Ледники, %**	Период наблюдений, годы
Терек	Владикавказ	26	1490	2540	32	21.5	244 (01.07.1977)	0.03	-2.8	3.4	1945–2018
Терек	Котляревская	16	8920	1800	133	14.9	776 (03.07.2006)	0.01	-2.5	1.8	1945–2018
Ардон	Тамиск*	33	1080	2490	30.6	28.3	210 (21.06.2002)	1.9	-0.5	2.1	1945–2002
Цея	Бурон	120	100	2820	4.0	40.0	104 (05.07.2017)	0.2	-2.9	17.9	1951–2018
Фиэгдон	Тагардон*	56	410	2170	7.8	19.0	51 (30.07.1978)	1.3	-4.1	1.9	1951–2002
Камбилеевка	Ольгинское	37	359	1260	4.0	11.1	115 (21.06.2002)	7.0	-4.1	-	1945–2018
Белая	Каро-Урсдон	80	304	1360	6.1	20.1	189 (21.06.2002)	0.09	-8.7	-	1958–2018
Малка	Каменноостское	32	1540	2000	15.4	10.0	171 (21.06.2002)	2.3	-1.2	3.5	1947–2018
Малка	Прохладная	16	9820	1900	96.7	9.8	832 (22.06.2002)	0.1	-2.6	3.6	1947–2018
Баксан	Заюково	23	2100	2360	35.4	16.9	297 (21.06.2002)	1.2	-1.6	7.3	1945–2021
Баксан	Тырныауз	50	838	2990	24.7	29.5	201 (11.08.1977)	0.1	-5.3	17.8	1971–2021
Чегем 1-й	Нижний Чегем	41	739	2500	15.5	21.0	175 (19.08.2005)	3.8	1.7	7.8	1945–2018
Черек	пгт Кашхатау (Советский)*	34	1350	2500	44.8	33.2	298 (01.08.1988)	3.2	-2.8	13.3	1947–2007
Черек Балкарский	Бабугент	36	695	2590	27.1	39.0	166 (05.07.1975)	0.2	-1.9	15.0	1945–2018
Нальчик	Белая речка	79	140	1510	3.0	21.4	56.1 (18.06.2009)	7.9	-10.8	-	1947–2018

Примечания: * пост закрыт; ** по данным RGI [RGI 6.0 Consortium, 2017].

Также стоит отметить, что происходит внутригодовое перераспределение стока, связанное с деградацией оледенения. С конца 1980-х–1990-х гг. наблюдается увеличение расходов мая и июня, с одной стороны, и снижение расходов июля и августа, с другой стороны, в речных бассейнах со степенью оледенения более 1% с интенсивностью 2–6%/10 лет (таблица 1.3). В работе [Rets et al., 2020] выявлены аналогичные тенденции – уменьшение объема талого ледникового стока, произошедшее за счет уменьшения площади оледенения, и тенденция смещения дат прохождения максимальных расходов воды на более ранние сроки.

Таблица 1.3 – Изменения среднемесячных расходов по данным гидрометрических створов в пределах исследуемого бассейна

Река - пост	Процент оледенения, %	Изменения среднемесячного расхода, %/10 лет			
		Май	Июнь	Июль	Август
Черек Балкарский – с. Бабугент	20	4.53	1.28	-0.81	-1.77
Черек – пгт Кашхатау(Советский)	17.6	7.10	2.96	0.18	-1.42
Баксан – г.Тырныауз	17.5	6.01	1.87	-4.03	-4.02
Цея – пгт Бурон	15.1	0.58	0.31	-1.94	-2.89
Чегем 1-й – с. Нижний Чегем	9.4	8.46	5.87	3.51	1.83
Баксан – с. Заюково	7.4	5.13	2.58	0.11	-1.10
Малка – ст. Прохладная	5.4	7.36	0.78	-1.85	-4.31
Терек – г. Владикавказ	5.4	4.05	1.11	-1.24	-2.96
Ардон – с. Тамиск	4.3	7.96	1.31	1.00	0.77
Малка – с. Каменномостское	4.1	4.45	3.73	1.88	0.90
Терек – ст. Котляревская	2.9	1.01	-0.17	-2.10	-2.67
Фиэгдон – с. Тагардон	2.9	3.89	4.57	0.55	-1.35
Белая – с. Кора-Урусдон	<1	-5.64	-0.96	-4.74	-2.89
Нальчик – с. Белая речка	<1	-9.15	2.15	3.62	6.76
Камбилеевка – с. Ольгинское	<1	-1.03	0.86	4.64	1.14

Для максимальных годовых расходов, наоборот, в большинстве случаев наблюдается отрицательная тенденция с интенсивностью 2–10%/10 лет (рис. 1.14), особенно для замыкающих высокогорную часть бассейна створов (р. Баксан – г. Тырныауз, р. Черек Балкарский – с. Бабугент, р. Цея – пгт Бурон), что объясняется уменьшением объема талого ледникового стока, произошедшего за счет уменьшения площади оледенения, снижением расходов июля и августа с конца 1980-х–1990-х гг. в речных бассейнах Северного Кавказа со степенью оледенения более 1% с интенсивностью 2–6%/10 лет. Следствием относительного уменьшения водности июля, в совокупности с более ранним началом снеготаяния, является общая для региона тенденция смещения дат прохождения максимальных расходов воды на более ранние сроки [Rets et al., 2020].

Для анализа изменений внутригодового хода внутри исторического периода ряды наблюдений были разделены на два периода – 1977–1997 и 1998–2018 гг. (рис. 1.15). В большинстве случаев наблюдается трансформация гидрографа – сдвиг половодья на более ранние сроки и уменьшения максимального расхода. Сдвиг половодья, главным образом, связан с увеличением температуры воздуха в весенние месяцы, что провоцирует интенсивное таяние снега.

Уменьшение максимального расхода наблюдаются, например, в створах р. Баксан – г. Тырнауз, р. Терек – ст. Котляревская и р. Черек – с. Бабугент. На Центральном Кавказе максимальные расходы воды наблюдаются, главным образом, в результате наложения крупного паводка на волну половодья [Rets, Kireeva, 2010; Коровин, Галкин, 1979]. 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. Однако, например, в створе р. Чегем – с. Нижний Чегем наблюдается увеличение среднего максимального расхода воды, что может быть связано с локальным ростом количества осадков или интенсивным таянием ледников.

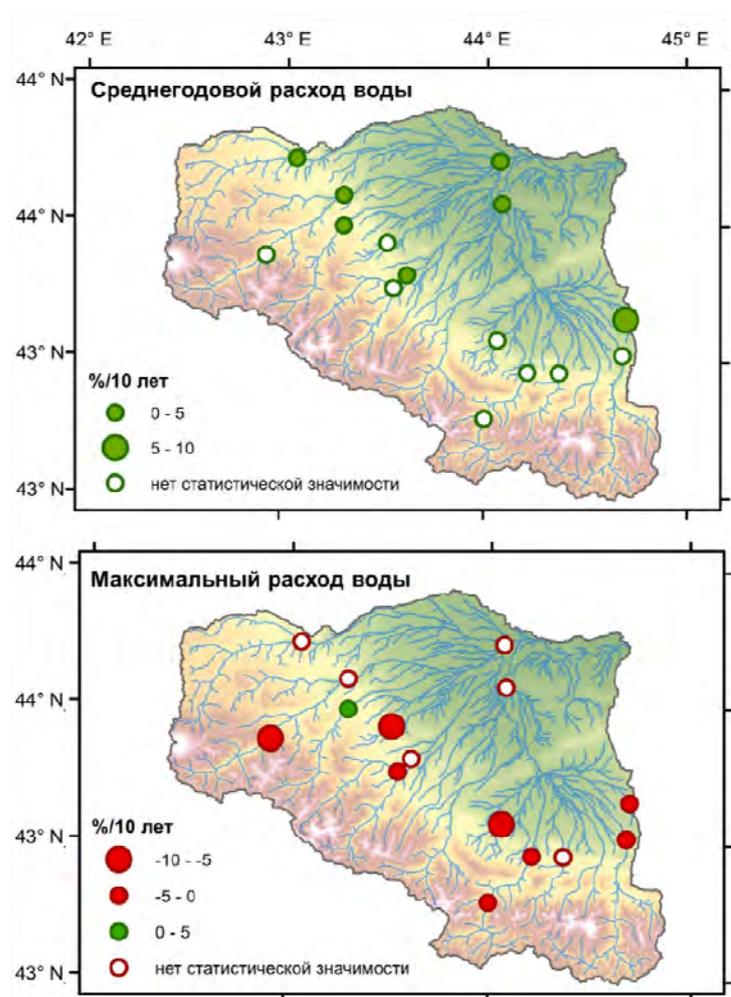


Рисунок 1.14 – Тренды изменения ($p = 0.05$) среднегодового и максимального годового расходов воды по фактическим данным гидрологических постов в бассейне р. Терек (1977–2014 гг.)

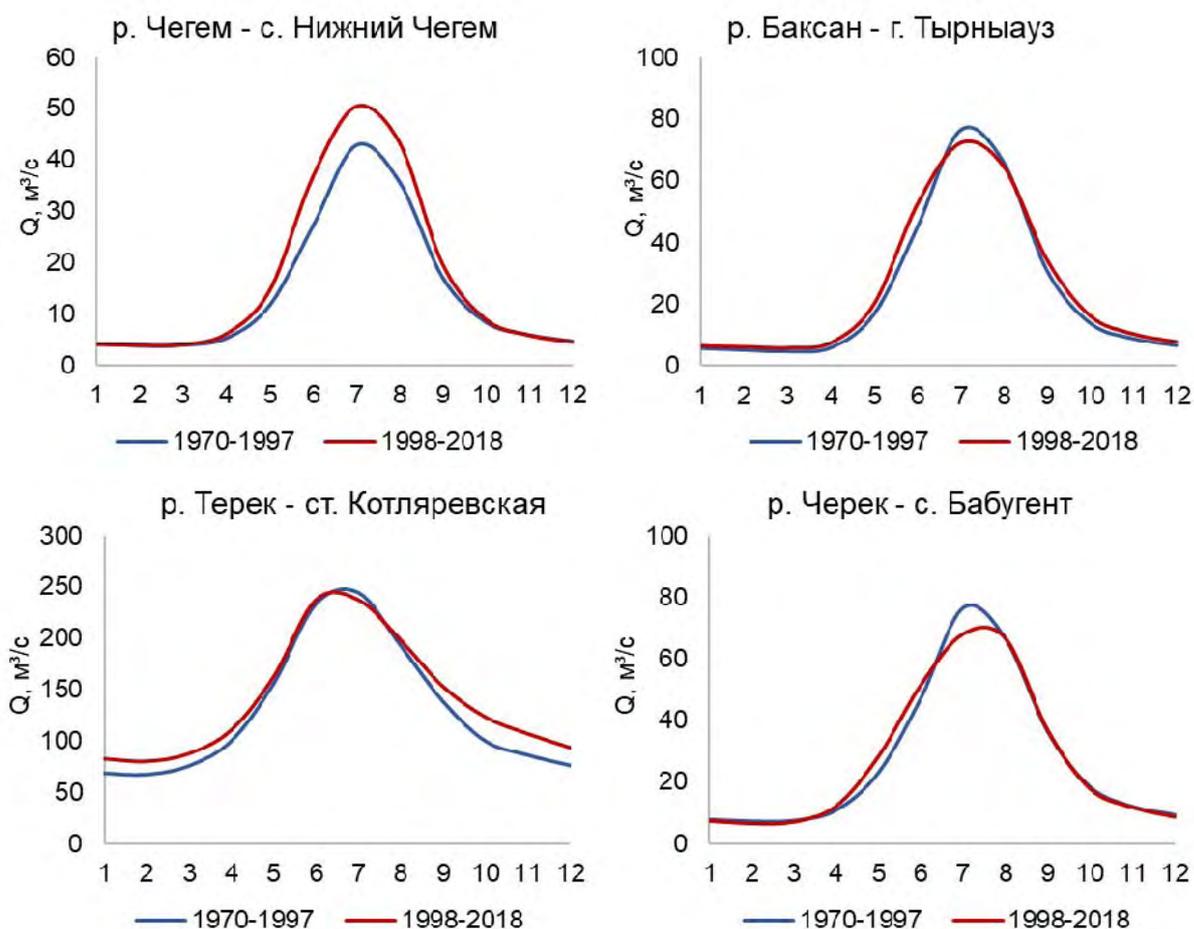


Рисунок 1.15 – Внутригодовой ход осредненных за периоды 1977–1997 гг. и 1998–2014 гг. среднемесячных расходов воды по фактическим данным гидрометрических постов

Все вышеперечисленные тенденции способствуют видоизменению гидрографов горных рек и перераспределению источников питания, что может повлиять на водообеспечение региона.

1.5. *Обобщение*

В рамках данной главы были проанализированы современные тенденции изменения основных гидрологических и метеорологических характеристик в бассейне р. Терек, что создало основу и понимание того, как изменяется климат, оледенение и сток в исследуемом регионе. Согласно полученным результатам, 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.

По результатам анализа динамики и изменений стока, среднегодовые расходы воды за 1970–2018 гг. увеличиваются с интенсивностью 2–7%/10 лет. Для максимальных годовых расходов, наоборот, в большинстве случаев наблюдается отрицательная тенденция с интенсивностью 2–10%/10 лет. Также стоит отметить, что происходит внутригодовое перераспределение стока – тенденция смещения дат прохождения максимальных расходов воды на более ранние сроки.

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

2.1. Обзор существующих моделей

В качестве базового программного комплекса для моделирования процессов формирования стока в бассейне р. Терек в рамках данного исследования использовался российский информационно-моделирующий комплекс (ИМК) ECOMAG (ECOLOGICAL Model for Applied Geophysics), автор модели Ю.Г. Мотовилов [Motovilov et al., 1999; Мотовилов, 2013]. 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 ИВП РАН под руководством Л.С. Кучмента [Кучмент и др., 1983]. Также существенным преимуществом ECOMAG является его интеграция с ГИС, что позволяет выделять ландшафтные единицы – элементарные водосборы и определять все необходимые для расчетов характеристики подстилающей поверхности и начальные значения параметров модели в автоматическом режиме. Модель ECOMAG имеет широкую географию применения [Морейдо, Калугин, 2017; Kalugin, Motovilov, 2018], в том числе в горных регионах [Gelfan et al.; 2016, Motovilov et al., 2017], однако впервые специально адаптирована в представленном исследовании для детальной оценки влияния изменений оледенения и климата на сток в высокогорном бассейне.

Для горных территорий в зарубежной практике применяется большое количество моделей (таблица 2.1), 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, 2019], GERM [Huss et al., 2008] и PREVAH [Gurtz et al., 1999].

Снеговая и ледниковая составляющие питания рек являются ключевыми компонентами гидрологического режима в горных регионах [Barnett et al., 2005], поэтому данные процессы должны быть учтены в моделях, что может быть достигнуто с различным уровнем сложности. Большинство гидрологических моделей, используемых в горных бассейнах, основаны на простом расчете таяния снежного покрова на основе индексно-температурного метода – эмпирические соотношения между температурой воздуха и скоростью таяния (коэффициент таяния) [Jenicek et al., 2018]. Однако швейцарская модель Alpine3D [Lehning et al., 2002] наиболее комплексно отображает процессы снегонакопления и снеготаяния. Данная модель включает в себя модель снежного покрова SNOWPACK, которая описывает взаимодействие снежного покрова с

почвой и атмосферой, моделируя ключевые физические процессы (массообмен и энергетический обмен). Вместе с тем данная модель требует детальную метеорологическую информацию с временным разрешением 1 час: температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра, осадки, входящие длинноволновое и коротковолновое излучения. Также еще одной гидрологической моделью, которая учитывает энергетический баланс и воспроизводит поперечное перераспределение снега, является одна из самых последних версий WaSiM, но пока применялась единично [Thornton et al., 2021]. Также существуют и другие модельные разработки, посвященные процессам снегонакопления и снеготаяния – в Италии [Endrizzi et al., 2014], во Франции [Vionnet et al., 2012] или Австрии [Strasser et al., 2004]. Однако, в большинстве случаев данные программные модули не используются в гидрологических моделях, что можно объяснить существенными требованиями к метеорологическим данным и значительными усилиями, необходимыми для разработки и внедрения таких моделей.

Ряд работ посвящен развитию ледникового блока гидрологических моделей [Horton et al., 2006; Addor et al., 2014; Finger et al., 2015; Etter et al., 2017]. При этом ледниковый блок большинства гидрологических моделей также основан на индексно-температурном методе [Hock, 1999], то есть реализуется путем применения коэффициента таяния. Но при моделировании стока с использованием климатических сценариев, где важно учитывать эволюцию ледника, такой способ приводит к необходимости синтеза моделей гидрологического цикла с отдельными гляциологическими моделями. Это привело к разработке гляцио-гидрологической модели GERM [Junghans et al., 2011; Farinotti et al., 2012; Finger et al., 2013], которая сочетает в себе простой индексно-температурный метод с новой схемой параметризации отступления ледников, которая в настоящее время широко применяется на международном уровне сообществом гляцио-гидрологического моделирования и называется “ Δh -параметризацией” [Huss et al., 2010]. Параметризация основана на том факте, что изменение высоты Δh ледника отвечает пространственным закономерностям – при отступании ледника Δh небольшие в районе аккумуляции, и, наоборот, большие вблизи языка горных ледников. Исходя из этого, Δh рассчитывается как ответ на изменения баланса массы согласно определенной эмпирической зависимости. В настоящее время развивается разработка гидрологических моделей с Δh -параметризацией. Например, реализация Δh -параметризации проведена в HBV-light [Seibert et al., 2018] для высокогорной части бассейна р. Рейн в центральной Швейцарии площадью 21 км² и SWAT [Schaffhauser et al., 2022] для бассейна р. Валь-Мартелло (Северная Италия) площадью 77 км². Однако программный код данных моделей модифицирован только для отдельных исследований на примере маленьких по площади бассейнов рек.

Таблица 2.1 – Гидрологические модели, наиболее часто использующиеся в зарубежной практике при моделировании стока в высокогорных бассейнах

Название модели	Расшифровка	Структура	Ледниковый блок		Пример использования	Бассейн
			Блок таяния	Динамический блок		
HBV-light	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning—light	С полураспределенными параметрами	Индексно-температурный метод	Δh-параметризация	Etter et al., 2017	Бассейн оз. Гигервальд
				-	Finger et al., 2015	р. Рон, Хинтеррайн и Ландкварт (Швейцария)
				-	Addor et al., 2014	р. Рон, Фордеррайн, Верзаска, Эмме, Тур и Венож (Швейцария)
GERM	Glacier Evolution Runoff Mode	С распределенными параметрами		Δh-параметризация	Huss et al., 2008	р. Навизенс (Швейцария)
					Junghans et al., 2011	р. Ландкварт (Швейцария)
SWAT	Soil Water and Assessment Tool	С полураспределенными параметрами		Δh-параметризация	Schaffhauser et al., 2022	р. Валь-Мартелло (Северная Италия)
					-	Rahman et al., 2013
PREVAH	Precipitation–Runoff–Evapotranspiration HRU Model	С распределенными параметрами		-	Addor et al., 2014	р. Рон, Фордеррайн, Верзаска, Эмме, Тур и Венож (Швейцария)
WaSiM	Water Flow and Balance Simulation Model	С распределенными параметрами		-	Addor et al., 2014	р. Рон, Фордеррайн, Верзаска, Эмме, Тур и Венож (Швейцария)
			Verbunt et al., 2003		р. Масса, Рон и Дишмабах (Швейцария)	

Более сложные методы учета динамики ледников на основе энергобалансовых методов развиваются в работах гляциологов, однако их сложно перенести на региональный уровень из-за большого количества исходных данных, необходимых для подобных моделей. Например, в моделях JULES [Shannon et al., 2019], GLIMB [Sakai, Fujita 2017] или AMelt [Рец и др., 2011] в отличие от индексно-температурного метода применяется энергобалансовый. Данные модели требуют в качестве входных данных более детальные метеорологические данные такие, как баланс длинно- и коротковолновой радиации, скорость ветра, влажность воздуха, атмосферное давление. Поэтому для регионального моделирования стока в крупных бассейнах используются более простые подходы.

Для высокогорной территории Кавказа адаптировано небольшое количество детальных моделей формирования стока. Из опубликованных работ – в бассейне р. Баксан (приток р. Терек) применялась модель HBV до замыкающего створа г. Тырнауз [Hagg et al., 2010], однако использовались только данные метеорологической станции «Терскол» до 2000 г., что явно недостаточно для оценки совокупного влияния изменений климата и дегляциации в пределах высокогорной части бассейна. Также для оценки притока воды в Краснодарское водохранилище при адаптации модели ECOMAG учитывались ледники в бассейне Кубани [Мотовилов, Гельфан, 2018], однако детальных исследований о влиянии изменения оледенения на сток не проводилось.

В связи со значительными изменениями климата в бассейне р. Терек, дегляциацией и необходимостью учета этих факторов при оценках возможных изменений стока, в данной работе актуализированы все необходимые гидрометеорологические и гляциологические данные, собрана и разработана детальная модель формирования стока для высокогорной части бассейна р. Терек на основе программного комплекса ECOMAG.

2.2. Информационно-моделирующий комплекс ECOMAG: описание структуры и требований к исходным данным

ECOMAG является моделью с пространственно-распределенными параметрами, где поверхность бассейна разделяется на отдельные ландшафтные элементы. В состав программного комплекса входит: математическая модель с упрощенными обыкновенными дифференциальными уравнениями и распределенными параметрами, специализированная географическая информационная система (ГИС), базы архивных и оперативных гидрометеорологических данных, информация о характеристиках территории, а также оболочка, управляющая функционированием всего комплекса (рис. 2.1).

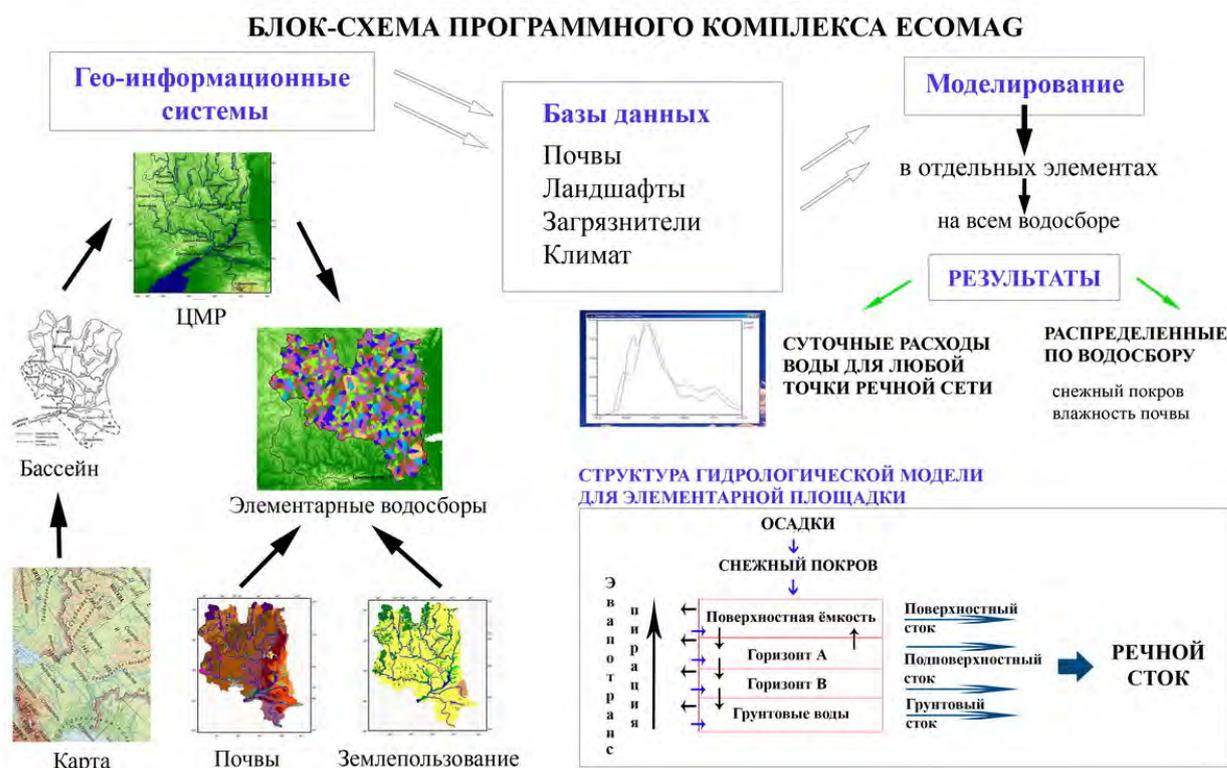


Рисунок 2.1 – Структура информационно-моделирующего комплекса ЕСОМАГ

Базы данных комплекса содержат гидрометеорологические данные, информацию о характеристиках почв, землепользования, вегетации, а также характеристики загрязняющих веществ и информацию об антропогенной нагрузке на территорию.

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. Геохимический блок модели учитывает процессы аккумуляции загрязнений на поверхности территории, их растворение осадками и проникновение в почву, взаимодействие с почвенным раствором и твердой фазой почвы, деградацию, перенос загрязнений поверхностным, внутрипочвенным, грунтовым и речным стоком [Мотовилов, 2016].

При модельной схематизации речного бассейна его поверхность разделяется на отдельные элементы с учетом особенностей рельефа, структуры речной сети, местоположения типов почв, растительности, землепользования и т.д. Моделирование гидрологических процессов на каждом ландшафтном элементе выполняется для четырех уровней (рис. 2.2): для поверхностного слоя почвы (горизонт А), подстилающего его более глубокого слоя (горизонт В), емкости грунтовых вод и емкости в зоне формирования поверхностного стока. В холодный период добавляется емкость снежного покрова. Расчет завершается описанием процессов трансформации воды, поступившей в речную сеть.

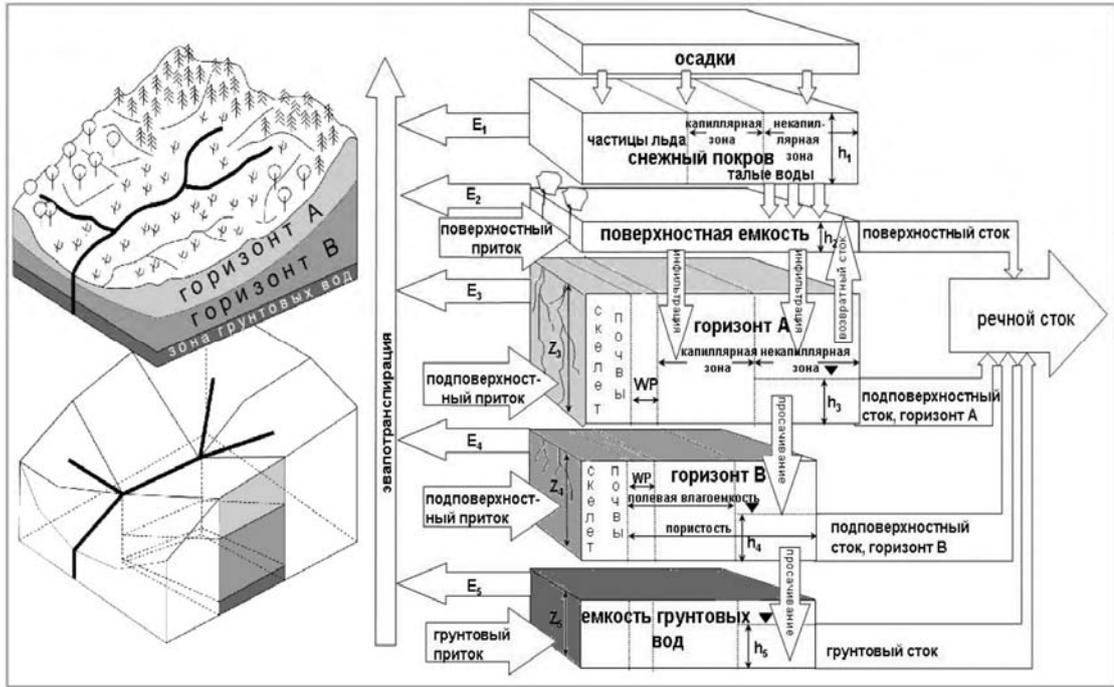


Рисунок 2.2 – Схематизация речного бассейна и вертикальная структура гидрологической модели для элементарной площадки [Мотовилов, 2016]

Управляющая оболочка позволяет связать информацию ГИС для рассматриваемой территории с информацией баз данных и запустить модель для проведения расчетов.

Для описания процессов формирования стока в модели используются следующие алгоритмы [Motovilov, 1999, Мотовилов, 2016]:

Горизонт почвы А. Предполагается, что пространственная функция распределения (F) поверхностной гидравлической проводимости насыщенной почвы (K) для каждого элемента речного бассейна может быть аппроксимирована показательной функцией

$$F(K) = 1 - \exp(-\alpha K), \quad \alpha = \frac{1}{K_m}, \quad (2.1.1)$$

где K_m – среднее значение K на элементе.

Горизонт почвы В. Режим влажности почвы в горизонте В описан уравнениями

$$Z_2 \frac{dW_2}{dt} = V_2 - V_3, \quad (2.1.2)$$

$$V_3 = K_2 \left(\frac{W_2 - WP}{F_2 - WP} \right)^4, \quad (2.1.3)$$

где V_3 – интенсивность просачивания почвенной влаги из горизонта В в зону грунтовых вод.

Зона грунтовых вод. Поток грунтовых вод рассчитывается по уравнениям

$$D_3 \frac{d}{dt} (b_L h_{3,L} + b_0 h_{3,0}) = (V_3 + V_G) b_m - (Q_{3,L} - Q_{3,0}) / L, \quad (2.1.4)$$

$$Q_3 = b K_{x,3} i h_3, \quad (2.1.5)$$

где h_3 – уровень грунтовых вод, Q_3 – боковой приток (индекс 0) и отток (индекс L) грунтовых вод для ландшафтного элемента, V_G – интенсивность водообмена между верхним горизонтом грунтовых вод и более глубокими слоями.

Поверхностный сток. Движение поверхностных вод по склонам описано уравнениями кинематической волны в упрощенной версии:

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} (b_L h_{4,L} + b_0 h_{4,0}) = R_0 b_m - (Q_{4,L} - Q_{4,0}) / L, \quad (2.1.6)$$

$$Q_4 = i^{1/2} h_4^{5/3} b / n, \quad R_0 = R - V_1 + R_r, \quad (2.1.7)$$

где h_4 – глубина поверхностного потока, Q_4 – боковой приток (индекс 0) и отток (индекс L) поверхностных вод для ландшафтного элемента, n – коэффициент шероховатости Маннинга.

Формирование снежного покрова. Для описания формирования снежного покрова и снеготаяния используется следующая система уравнений:

$$\frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{d}{dt} (I h_5) = R_s - E_s - S_T + S_f, \quad (2.1.8)$$

$$\frac{d}{dt} (W_5 h_5) = R_w + S_T - E_w - V_5 - S_f, \quad (2.1.9)$$

$$\frac{dh_5}{dt} = \rho_w \left[\frac{R_s}{\rho_n} - \frac{S_T + E_s}{\rho_i I} \right] - v_s (h_5, I, W_5), \quad (2.1.10)$$

где I и W_5 – объемное содержание льда и воды в снеге, r_i и r_w – удельный вес льда и воды, ρ_n – плотность нового снега, h_5 – глубина снежного покрова, V_5 – водоотдача снежного покрова, которая рассчитывается, принимая во внимание процесс задержания талых вод в снеге под действием капиллярно-сорбционных сил.

Тепловой режим снега и почвы. Предполагается, что вертикальные температурные профили в снеге, мерзлой и талой почве незначительно отличаются от линейных и перемещением влаги к фронту промерзания можно пренебречь. При этих условиях динамика глубины промерзания (H_f) и глубины оттаивания почвы (H_T) может быть описана следующими уравнениями:

$$Q_f \frac{dH_f}{dt} = \frac{\lambda_f T_0}{H_f} - \frac{\lambda_T T_g}{H_g - H_f}, \quad (2.1.11)$$

$$H_T = \left(H_f^2 + \frac{2\lambda_T T}{Q_f} \delta t \right)^{0.5}, \quad (2.1.12)$$

$$T_0 = \frac{\lambda_S T H_f}{\lambda_S H_f + \lambda_f h_5}, \quad Q_f = \rho_w L_f (W - W_u), \quad (2.1.13)$$

где H_g – глубина уровня грунтовых вод с температурой T_g , λ_s , λ_f , λ_T – коэффициенты теплопроводности снега, мерзлой и талой почвы, соответственно, T_0 – температура на границе “почва–снег”, L_i – скрытая теплота плавления льда, W_u – содержание незамерзшей влаги в почве при 0°C , dt – период времени.

Инфильтрация воды в мерзлую почву. Инфильтрация талых и дождевых вод в мерзлую почву описана следующими уравнениями

$$V_1 = K_f \left[1 - \exp\left(V_5 / K_f\right) \right], \quad (2.1.14)$$

$$K_f = K_l \left(\frac{P_l - \bar{I} - WP}{P_l - WP} \right)^4 / (1 + k_i \bar{I})^2, \quad (2.1.15)$$

$$\bar{I} = \frac{\rho_w}{\rho_i} \frac{H_f - H_T}{Z_1} (W_1 - W_u), \quad (2.1.16)$$

где K_f – гидравлическая проводимость насыщенной мерзлой почвы, k_i – эмпирический параметр ($k_i = 8$).

Речной сток. Боковой приток к элементу речной сети рассчитывается как

$$Q_{lat} = Q_{1,n} + Q_{3,n} + Q_{4,n}, \quad (2.1.17)$$

где индекс n обозначает боковой приток в элемент речной сети от соседних к этому элементу левого и правого склонов водосборной площади.

Речной сток на элементе речной сети описан упрощенной версией уравнения кинематической волны

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} (b_{6,L} h_{6,L} + b_{6,0} h_{6,0}) = (Q_{lat} + Q_{6,0} - Q_{6,L}) / L_6, \quad (2.1.18)$$

$$Q_6 = i_6^{1/2} h_6^{5/3} b_6 / n_6, \quad (2.1.19)$$

где h_6 – глубина речного потока, b_6 и L_6 – ширина и длина элемента реки в плане, Q_6 – расход воды, n_6 – коэффициент шероховатости Маннинга, i_6 – уклон реки.

2.3. *Создание баз исходной информации для модели формирования речного стока в бассейне р. Терек*

Для адаптации модели формирования стока к конкретному бассейну, помимо использования базовых уравнений модели ЕСОМАГ, необходимо собрать обширный объем гидрометеорологических данных и информации о подстилающей поверхности. В качестве основных видов информации для формирования баз данных ИМК ЕСОМАГ используются следующие виды информации: цифровые модели рельефа (далее – ЦМР) с разрешением 1 км и детальнее, векторные данные о гидрографической сети и расположении гидрологических постов и метеорологических станций, серии цифровых

тематических карт (водных ресурсов, почвенная, ландшафтная, оледенения и т.д.), базы данных метеорологических характеристик с суточным шагом (температура воздуха, дефицит влажности воздуха, осадки), базы данных о расходах воды в различных точках речной сети (для калибровки и валидации модели) (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Исходные данные для модели ECOMAG в бассейне р. Терек

Тип данных	Период/Дата публикации данных	Разрешение/ масштаб	Ресурс
Физическо-географические характеристики бассейна			
Цифровая модель рельефа SRTM	2000 г.	90м×90м	Consultative Group for International Agriculture Research Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI: http://srtm.csi.cgiar.org/)
Ландшафтное районирование	1990 г. (республика Северная Осетия), 1997 г. (Кабардино-Балкарская республика)	1 : 750 000	Атлас Кабардино-Балкарской республики и республики Северная Осетия
Почвенный покров	1990 г. (республика Северная Осетия), 1997 г. (Кабардино-Балкарская республика)	1 : 750 000	Атлас Кабардино-Балкарской республики и республики Северная Осетия
Площадь оледенения	2001–2003 гг.	10м×10м	RGI 6.0 [RGI Consortium, 2017]
Гидрометеорологические данные			
Расходы воды	1977–2018 гг.	1 сутки	Гидрологический ежегодник
Приземная температура воздуха, суммы осадков, дефицит влажности воздуха	1977–2014 гг.	1 сутки	Данные метеорологических станций

В связи с высокой степенью расчлененности рельефа в бассейне р. Терек, для получения удовлетворительных результатов моделирования необходимо применение цифровых моделей с пространственным разрешением 90 м и детальнее. Поэтому в качестве основы для моделирования формирования стока использовалась ЦМР SRTM

(Shuttle radar topographic mission - радарная топографическая съемка большей части территории земного шара), разрешение которой составляет 90 м.

Для задания характеристик и параметров модели используются почвенные и ландшафтные карты различных масштабов. Как базовая для территории России используется почвенная карта России в масштабе 1: 2 500 000, разработанная коллективом авторов под руководством М.А. Глазовской и ландшафтная карта стран бывшего СССР в масштабе 1 : 2 500 000, составленная коллективом авторов под руководством В.А. Николаева.

Однако, данная картографическая информация не обеспечивает достаточную степень детализации и точности для решения поставленных задач для исследуемого речного водосбора. При использовании карт, указанных выше, на водосборе выделяется небольшое количество типов почв и ландшафтов, тем самым суть использования модели с распределенными параметрами обесценивается. Для решения этой проблемы в качестве картографической информации использовались почвенная и ландшафтная карты из Атласа Кабардино-Балкарской Республики и Республики Северная Осетия в масштабе 1:750 000. Карты цифровались вручную и внедрялись в ГИС-проект по подготовке исходных данных. После оцифровки легенды карт соотносились с базой почв и ландшафтов из соответствующих баз модели ЕСОМАГ для корректного задания параметров для типов почв и ландшафтов.

Информационное гидрометеорологическое обеспечение – одна из основ для проведения расчетов с помощью ИМК ЕСОМАГ. Основными метеорологическими характеристиками, необходимыми для расчета по модели являются среднесуточные осадки, температура воздуха и дефицит влажности. Гидрологическая информация содержит в себе данные о среднесуточных расходах воды на постах и служит для проверки результатов моделирования стока воды. Гидрометеорологическая информация для бассейна реки Терек была предоставлена Кабардино-Балкарским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, а также взята из Метеорологической базы ИВП РАН [Патент РФ....., 2020].

Для каждой из трех характеристик температуры, осадков и дефицита влажности по каждому году был подготовлен отдельный файл, содержащий в себе матрицу из наблюдений, где каждая строка соответствует конкретной дате, а каждый столбец соответствует определенной метеостанции. Все отсутствующие данные были заменены на «-99».

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 г. – на основании данных Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО [<https://gmvo.skniivh.ru/>]), а также архива Кабардино-Балкарского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Гидрологическая информация содержит в себе среднесуточные расходы воды по гидрологическим постам и служит для проверки результатов моделирования во время калибровки и валидации модели.

2.4. Построение речной сети и схематизация бассейна р. Терек с учетом оледенения

Для моделирования процессов поступления, потерь и стекания воды по склонам водосбора и в русловой сети, необходимо провести схематизацию бассейна и речной сети. В качестве основной расчетной пространственной единицы (расчетной ячейки) для моделирования крупных речных бассейнов в современной версии модели ЕСОМАГ принимается водосбор малой реки или элементарный водосбор. Специализированный ГИС-комплекс ЕСОМАГ Extension на основе цифровой модели рельефа и анализа линий тока в автоматическом режиме прорисовывает структуру речной сети и выделяет элементарные речные водосборы с различной степенью детальности в зависимости от заданного критического числа ячеек сетки, при «слиянии» которых образуется модельная речная сеть. Такая схема позволяет быстро адаптировать модель к любому по площади водосбору и ускоряет процесс подготовки данных для моделирования.

Основными объектами, с которыми работает ГИС-комплекс, являются грид-темы – растровый формат записи пространственной информации в виде регулярной сетки или матрицы, организованной как набор строк и столбцов. Исходными данными для моделирования сети водотоков и элементарных речных бассейнов является цифровая модель рельефа.

Грубое разрешение исходной цифровой модели рельефа может служить причиной несовпадения реальной и модельной речных сетей, особенно в тех местах, где рельеф выражен слабо. ГИС-модуль содержит механизм корректировки рельефа, который включает в себя изменение значений высот отдельных ячеек рельефа с последующим пересчетом направления стока в ячейках, и перестроение модельной речной сети. В случае построения речной сети в горных районах такая проблема возникает редко, и в пределах высокогорной части бассейна смоделированная полностью соответствует реальной речной сети (рис. 2.3).

Всем элементарным водосборам передается информация о типах почв и ландшафтов, которая считывается с соответствующих карт в программном модуле

ESOMAG Extension комплекса ArcView, а необходимые для расчетов характеристики почв и ландшафтов автоматически выбираются из баз данных модельного комплекса ESOMAG, и в дальнейшем усредняются с учетом весовых коэффициентов по занимаемой ими площади в пределах элементарного водосбора. Выполненная схематизация бассейна р. Терек изображена на рис. 2.4, всего было выделено 2050 элементарных водосборов со средней площадью 9.9 км².

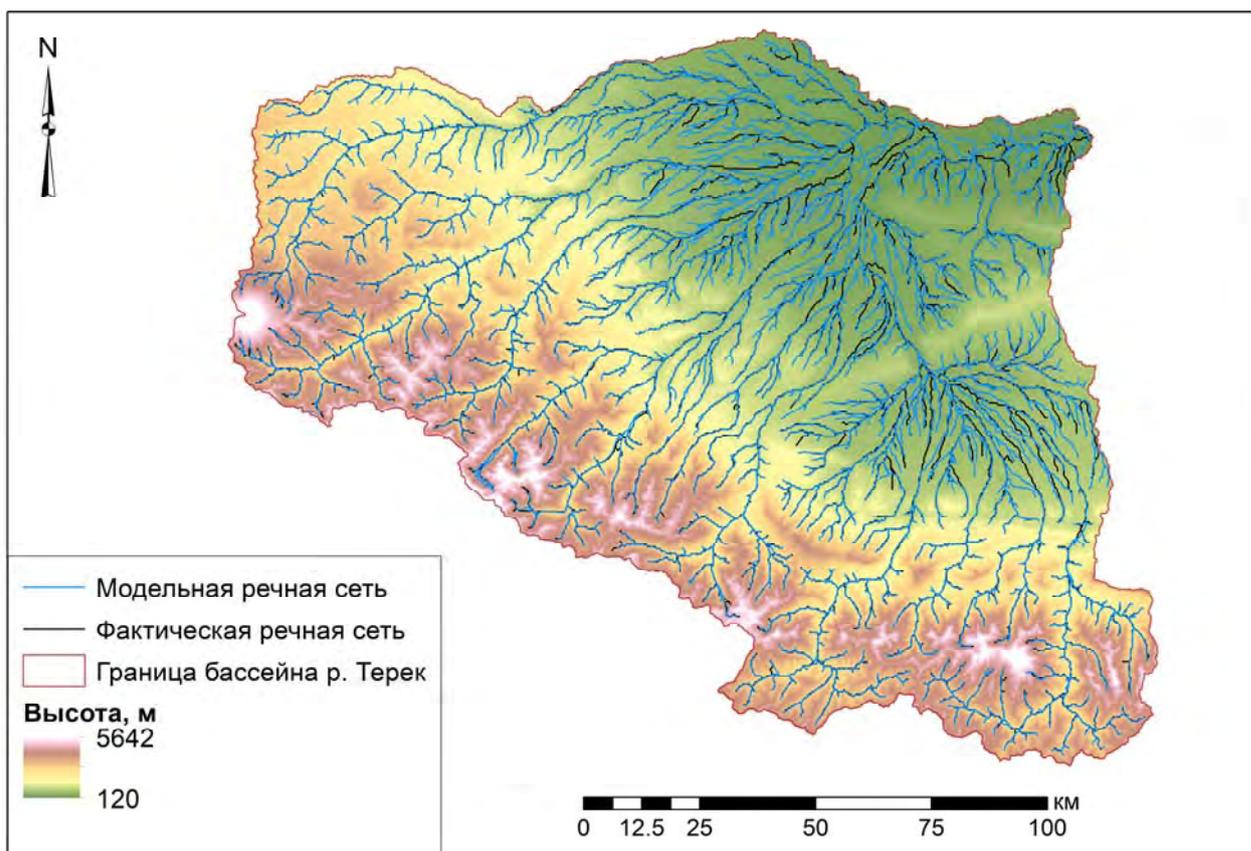


Рисунок 2.3 – Модельная и фактическая речная сеть бассейна р. Терек

В модели интерполяция метеорологических характеристик для каждого элементарного водосбора проводится с учетом обратно взвешенных расстояний от метеостанций до центра элементарного водосбора (чем дальше метеостанция от удельного водосбора, тем меньше ее вес при интерполяции) и с учетом высотных градиентов температуры воздуха и осадков, заданных пользователем по фактическим данным. Количество метеостанций для интерполяции определяется пользователем и уточняется при калибровке модели. Для условий высокогорной территории, где наблюдаются значительные различия в метеоусловиях даже между соседними долинами, нами было выявлено, что оптимальной является интерполяция по данным двух ближайших метеостанций.

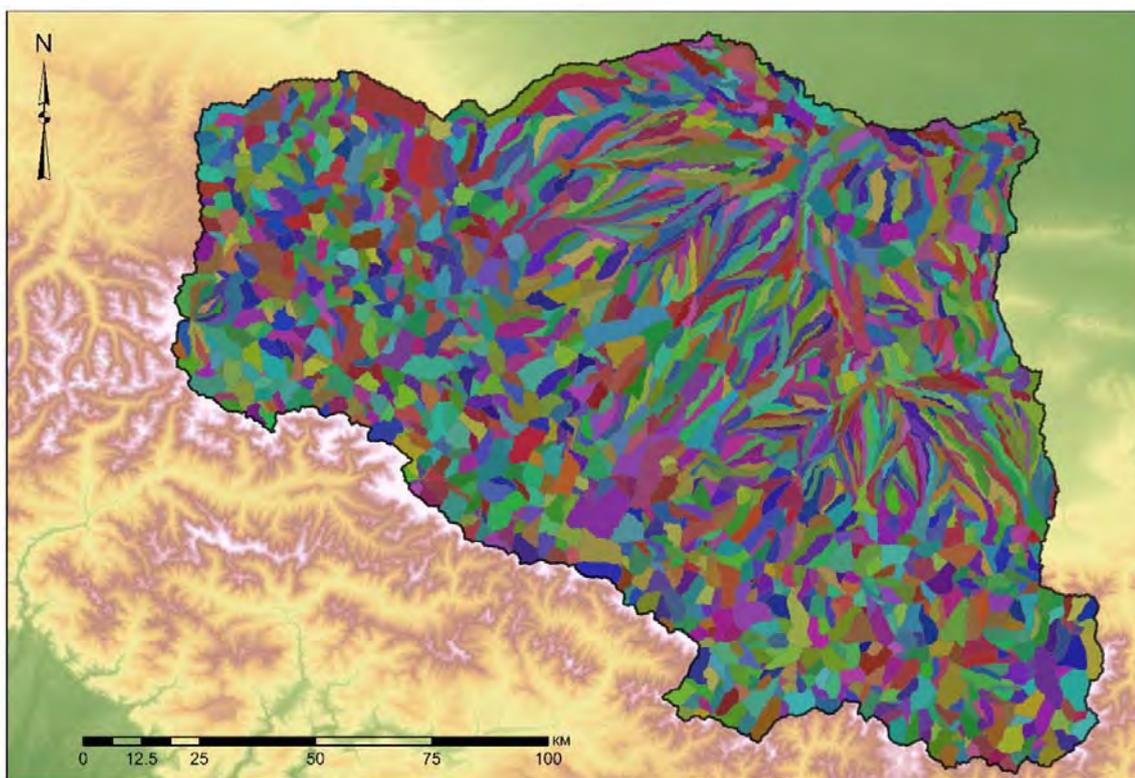


Рисунок 2.4 – Схематизация бассейна р. Терек в программном комплексе ECOMAG

Площадь водосбора р. Терек до замыкающего створа «Моздок» по модельной структуре речной сети составила 20300 км². Погрешность определения площади водосбора оказалась менее 2% по сравнению с данными, приведенными в [Ресурсы поверхностных вод СССР..., 1975; Многолетние данные..., 1987], где площадь бассейна оценивается как 20 600 км².

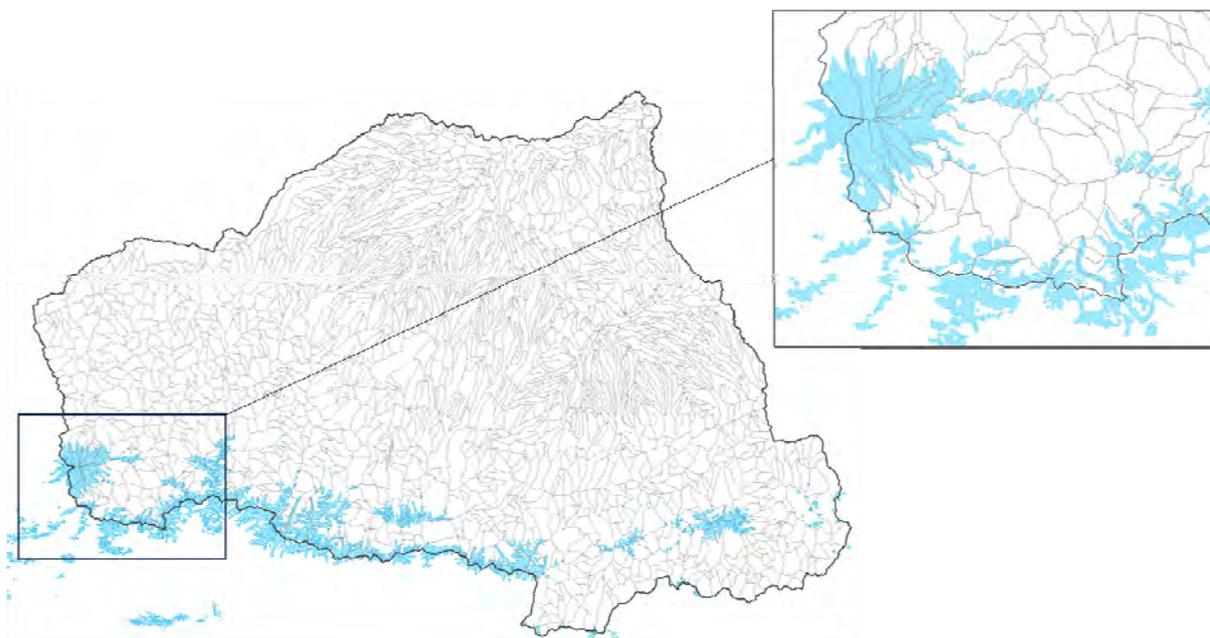


Рисунок 2.5 – Границы оледенения в бассейне р.Терек в пределах выделенных элементарных водосборов для моделирования стока в ИМК ECOMAG

Для подключения ледникового блока модели ECOMAG с использованием ГИС-технологий определялись площади и местоположение ледников на основе данных Randolph Glacier Inventory [RGI 6.0 Consortium, 2017] (рис. 2.5). Доля оледенения в пределах бассейна р. Терек составляет 3.3%. При этом ледниками покрыто 214 удельных водосбора (из 2050), из которых 130 – более, чем на 10%. Для работы ледникового блока создается дополнительный управляющий файл, в котором указываются все элементарные водосборы, в которых есть оледенение, а также процент оледенения внутри каждого водосбора.

2.5. Модификация ледникового блока ИМК ECOMAG

Особенности генезиса формирования стока в бассейне р. Терек обусловили необходимость модификации ледникового блока модели ECOMAG, который описывает летнее питание р. Терек и ее притоков за счет таяния ледников и снежников в высокогорных областях.

Ледниковый блок модели формирования стока ECOMAG функционирует следующим образом: задаются элементарные водосборы, в которых есть оледенение, а также процент оледенения внутри каждого элементарного водосбора. Далее при расчетах летнего таяния запасы воды на этих участках не лимитируются. То есть, когда стаивает снежный покров, талый сток все равно продолжает поступать, при этом коэффициент таяния единый как для снега, так и для льда.

Коэффициент таяния в модели формирования стока ECOMAG – это аналог индексно-температурного подхода в гляциологических моделях, который предполагает эмпирическую связь между температурой воздуха и скоростью таяния [Hock, 2003]. В глобальных гляциологических моделях из-за простоты подхода и ограниченности детальных метеорологических данных, как правило, абляция рассчитывается с использованием именно индексно-температурных моделей [Hock et al., 2019; Marzeion et al., 2012; Zekollari et al., 2019; Raper, Braithwaite, 2009]. В данном подходе таяние рассчитывается исходя из суммы дней с положительной температурой воздуха и учитывается в коэффициенте DDF (degree-day factor), имеющем размерность мм*сут/°С. В глобальных гляциологических моделях коэффициент DDF калибруется согласно фактическим данным баланса массы ледников, и может различаться от ледника к леднику.

В модели ECOMAG коэффициент таяния льда до настоящего времени отдельно не учитывался, и вся поверхность ледника таяла с коэффициентами таяния снега. При этом

коэффициент таяния льда превышает коэффициент таяния снега при идентичных условиях в результате разницы в альбедо между этими поверхностями [Braithwaite, 1995]. Снег, как правило, характеризуется более высоким альбедо, чем лед, варьирующимся примерно в пределах 0.7–0.9 по сравнению с 0.3–0.5 для льда [Paterson, 1994].

В связи с этим ледниковый блок модели был модифицирован и введен отдельный коэффициент таяния для льда. Подпрограмма для расчета таяния льда всегда вызывается для тех расчетных водосборов, где есть ледник. В начале лета, когда водосбор покрыт снежным покровом, тает только снег с коэффициентом таяния снега. По мере таяния и схода снега, покрытость снегом расчетного элемента уменьшается. Когда площадь, покрытая снегом, становится меньше площади оледенения, то на обнажившейся от снега площади начинает таять лед с коэффициентом таяния льда. Блок-схема расчета ледникового стока представлена на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Блок-схема работы ледникового блока ($k_{\text{снег}}$ – коэффициент таяния снега, $k_{\text{лед}}$ – коэффициент таяния льда)

Тестовые расчеты с применением модифицированного ледникового блока показали, что наблюдается рост пиков во вторую половину летнего периода (июль–октябрь), когда ледники преимущественно освобождаются от снега (рис. 2.7). Далее в расчетах использовалась модифицированная версия подпрограммы для расчета таяния ледников.

Поскольку коэффициенты таяния должны неявно учитывать все факторы, которые вызывают изменения в тепловом балансе, они могут различаться от бассейна к бассейну, поэтому в основной версии модели ECOMAG также сохранена возможность калибровки коэффициентов таяния путем введения общего множителя на коэффициенты таяния (параметр ALFOPT), а при модификации ледникового блока нами введен дополнительный параметр – множитель на коэффициент таяния льда (параметр ALFOPT_лед).



Рисунок 2.7 – Тестовые расчеты с использованием модифицированного ледникового блока – г/п Тырнауз (k – коэффициент таяния льда равен коэффициенту таяния снега, $k*1.6$ – коэффициент таяния льда в 1.6 раза превышает коэффициент таяния снега)

2.6. Калибровка и валидация модели ECOMAG при расчетах по данным сетевых метеорологических наблюдений на основе данных о расходах воды

Для дальнейшей адаптации модели к исследуемому бассейну необходимо было провести калибровку ее параметров. Некоторые из параметров модели ECOMAG, описывающие характеристики ландшафтов и почв, задаются на начальном этапе подготовки данных во время создания ГИС-проекта и обычно не изменяются в процессе калибровки.

Для калибровки модели используют коэффициенты (множители), которые влияют на величину основных параметров и которые обычно очень индивидуальны для каждого водосбора. Список основных калибровочных параметров, использовавшихся при моделировании стока р. Терек, представлен в таблице 2.3. Обозначения коэффициентов представлены согласно документации модели и будут далее использоваться в тексте работы.

Калибровка модели выполняется последовательно – каждый параметр поочередно изменяется, затем запускается расчет, анализируется результат, формируется вывод о влиянии изменения коэффициента на результат моделирования. Затем эта операция повторяется с этим же коэффициентом или проверяется другой. Главным образом, эффект от изменения коэффициента проверяется тремя способами: общий сток, визуальное совпадение гидрографов и на основе нескольких критериев оценки качества моделирования.

Таблица 2.3 – Список основных калибровочных параметров модели ECOMAG, использовавшихся при моделировании стока р. Терек, и их влияние на гидрограф

№	Параметр	Название	Влияние на гидрограф
1	EKOPT	множитель на коэффициент испарения	увеличение параметра уменьшает пики и объем стока
2	ZAOPT	множитель на толщину горизонта А (значение 0.5 м среднее для всех)	увеличение параметра снижает максимальные расходы половодья и межени
3	ALFOPT	множитель на коэффициент таяния (мм/сут*°C)	при увеличении параметра происходит сдвиг половодья в более ранние сроки и увеличение максимума
4	TCRpre	коэффициент на критическую температуру определения фазы атмосферных осадков (жидкие/твердые)	увеличение параметра приводит к увеличению снеговых осадков и объема половодья
5	ULOPT	коэффициент на водоудерживающую способность снега (какая часть воды задерживается снегом)	снижает основные пики, повышает сток при остальном снеготаянии
6	TCRst	коэффициент на критическую температуру таяния снежного покрова	при увеличении параметра происходит сдвиг половодья в более поздние сроки
7	rnew	плотность свежеснеговывпавшего снега, г/см ³	снижение параметра снижает все пики
8	Qpodpitka	величина базового стока в реках, см/день	увеличение параметра увеличивает базовый меженный сток

Рассмотрим основные критерии оценки качества, которые применяются в практике гидрологического моделирования. Во-первых, критерий эффективности моделирования Нэша-Саттклифа (NSE), показывающего долю дисперсии исследуемой характеристики, объясняемую рассматриваемой моделью. В оболочке программы ECOMAG, критерий рассчитывается автоматически. Критерий NSE рассчитывается по формуле:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{f(i)} - Q_{sim(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{f(i)} - \bar{Q}_f)^2},$$

где $Q_{f(i)}$ – фактический расход воды в i -е сутки, $Q_{sim(i)}$ – смоделированный расход в i -е сутки, \bar{Q}_f – средняя величина фактического расхода воды за период расчета $I = 1, n$.

То есть, когда фактические и рассчитанные гидрографы совпадают, значение $NSE=1$. Однако, на практике $NSE<1$, в том числе может быть и отрицательным значением. Считается, что результаты моделирования хорошие при $NSE>0.80$, удовлетворительные при $0.80>NSE>0.36$ и неудовлетворительные при $NSE<0.36$ [Борщ и др., 2023].

Второй критерий, который активно используется для оценки качества моделирования, – относительная ошибка расчетов ($BIAS$, %), которая рассчитывается по формуле:

$$BIAS = \frac{\overline{Q_f} - \overline{Q_{sim}}}{\overline{Q_f}} \times 100\%,$$

где $\overline{Q_f}$ и $\overline{Q_{sim}}$ средняя величина фактического и смоделированного расхода воды за период расчета.

В практике моделирования принято, что относительная ошибка для многолетнего периода не должна превышать 10–15%.

Весь период, в достаточной степени освещенный гидрометеорологическими данными в пределах бассейна р. Терек, был разделен на период калибровки и период валидации. Для калибровки и валидации использовались данные четырех гидрологических постов: р. Баксан – г. Тырныауз, р. Баксан – п. Заюково, р. Малка – с. Каменноостское, р. Чегем – с. Нижний Чегем, р. Терек – ст. Котляревская. Период калибровки включал в себя 9 лет (с 2000 года по 2008 год) (рис. 2.8). Данные гидрологических постов на равнине, например, данные г.п р. Малка – Прохладная были признаны непригодными для калибровки модели, т.к. при анализе фактических данных было выявлено, что суммарный сток по данным вышележащих по течению постов, полностью определяющих сток реки у г.п. Прохладная, значительно выше, чем сток в створе р. Малка – г.п. Прохладная ниже по течению. Это может быть связано как со значительным водозабором из реки на нужды сельского хозяйства, так и с погрешностями измерений. Часть гидрологических постов, расположенных в пределах исследуемого бассейна, имеют зарегулированный сток [Отчет..., 2006], и также не использовались при калибровке модели. Например, на р. Черек сток зарегулирован Черекской ГЭС, что делает данные поста р. Черек – г/п Кашхатау (Советский), расположенного ниже водохранилища, непригодным для калибровки модели без дополнительного учета регулирования.

Кроме того, для каждого гидрометрического поста была оценена степень тесноты связи рассчитанных и фактических объемов стока за месяц с помощью корреляционного отношения R^2 , меняющегося от 1 (функциональная связь) до 0 (отсутствие связи) (таблица 2.4, рис. 2.9).

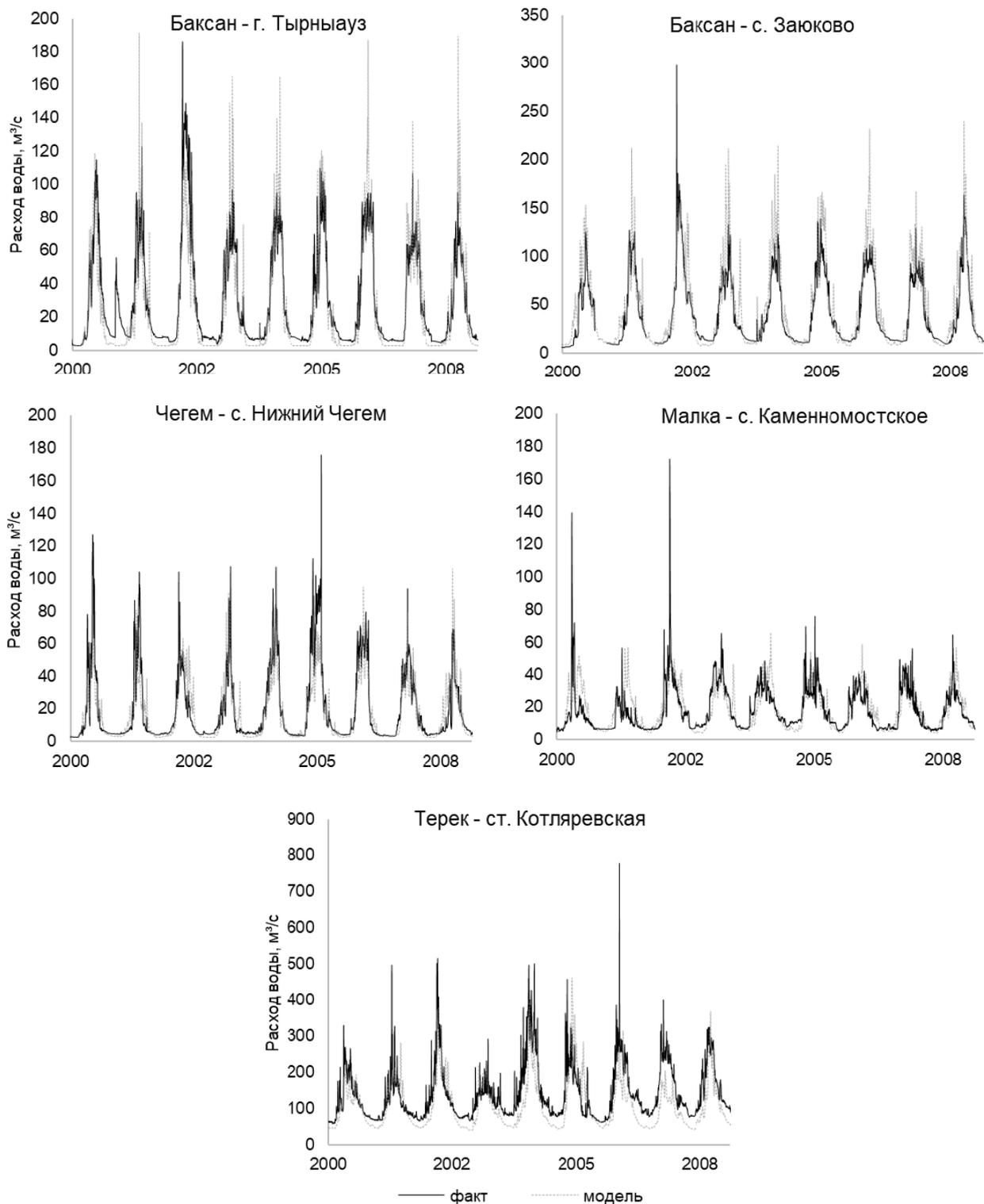


Рисунок 2.8 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Терек за период калибровки модели

Согласно приведенным выше градациям критериев качества NSE и BIAS, получены хорошие и удовлетворительные результаты расчета суточных и среднемесячных гидрографов.

Таблица 2.4 – Результаты калибровки и валидации модели формирования стока по данным о расходах воды

Гидрологический пост	Оледенение, %	Площадь водосбора, км ²	Калибровка 2000–2008гг.			Валидация 2009–2017 гг.		
			сутки		месяц	сутки		месяц
			NSE	BIAS	NSE	NSE	BIAS	NSE
р. Баксан – г. Тырнауз	17.5	838	0.76	-12.8	0.87	0.74	-10.0	0.86
р. Баксан – с. Заюково	7.4	2100	0.66	15.2	0.80	0.53	19.9	0.62
р. Чегем – с. Нижний Чегем	7.3	739	0.73	-12.4	0.81	0.62	-1.7	0.78
р. Малка – с. Каменноостское	3.4	1540	0.42	5.1	0.61	0.48*	5.3*	0.68*
р. Терек – ст. Котляревская	2.9	8920	0.56	-7.0	0.72	0.45*	-9.4*	0.68*

Примечание: * 2009–2014 гг.

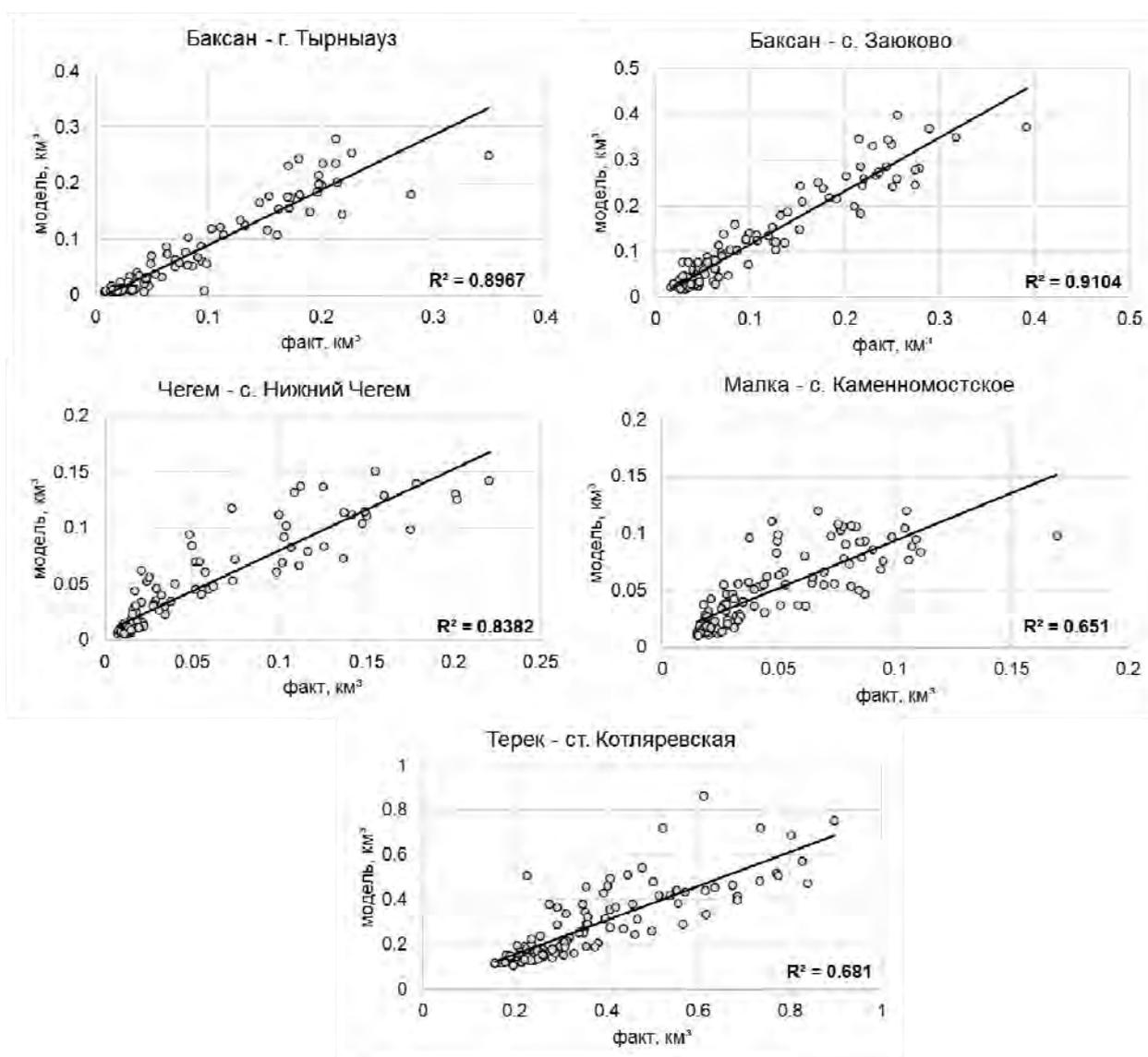


Рисунок 2.9 – Связь фактических и рассчитанных месячных объемов стока на различных гидрометрических постах в бассейне р. Терек за период калибровки

Процесс валидации модели заключается в проверке параметров, полученных во время калибровки модели, на другом периоде. Период валидации включал 9 лет – с 2009 по 2017 год (примеры гидрографов для этих постов представлены на рисунке 2.10, связь фактических и рассчитанных месячных объемов стока – на рис. 2.11). Результаты калибровки и валидации представлены в табл. 2.4.

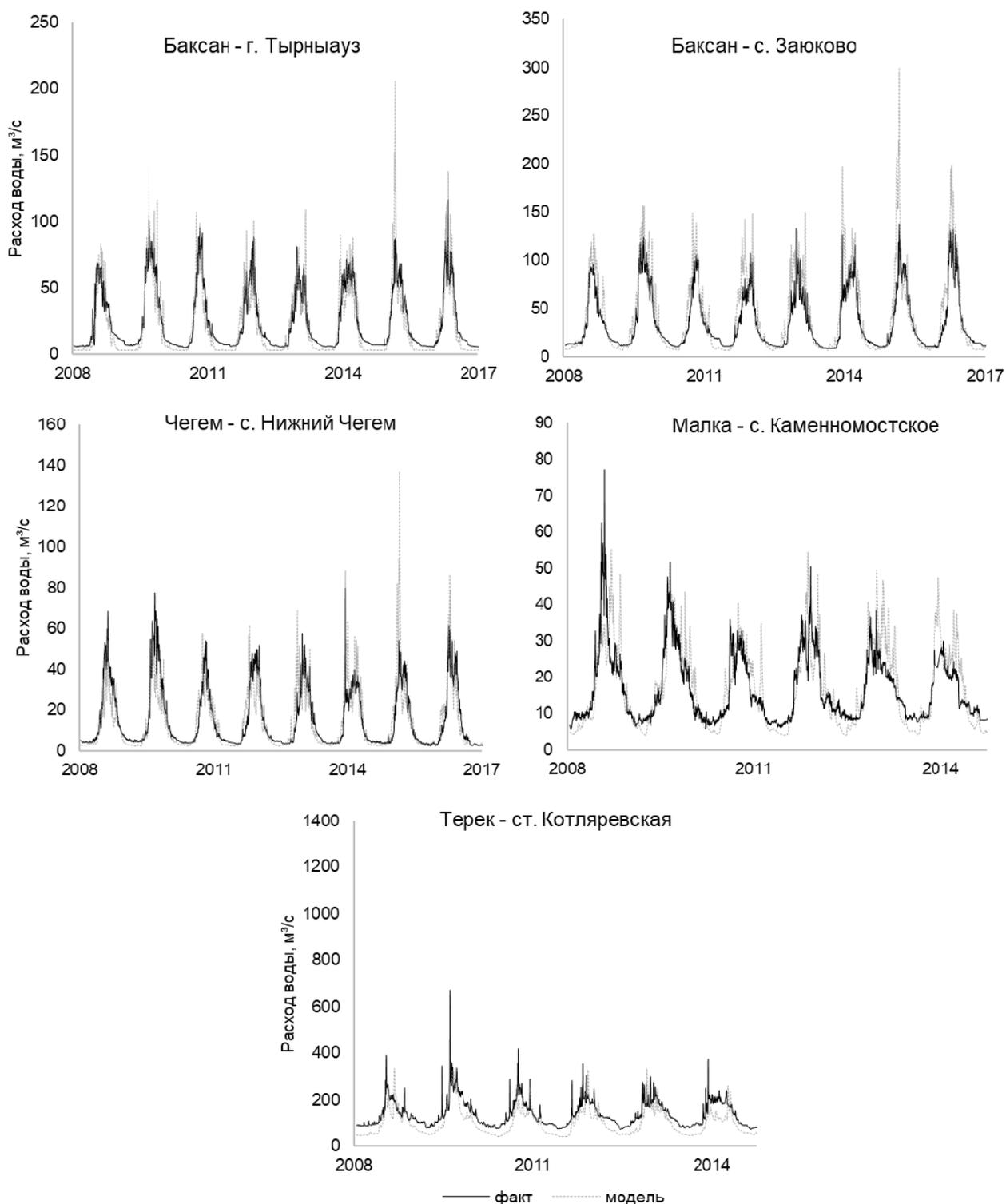


Рисунок 2.10 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Терек за период валидации модели

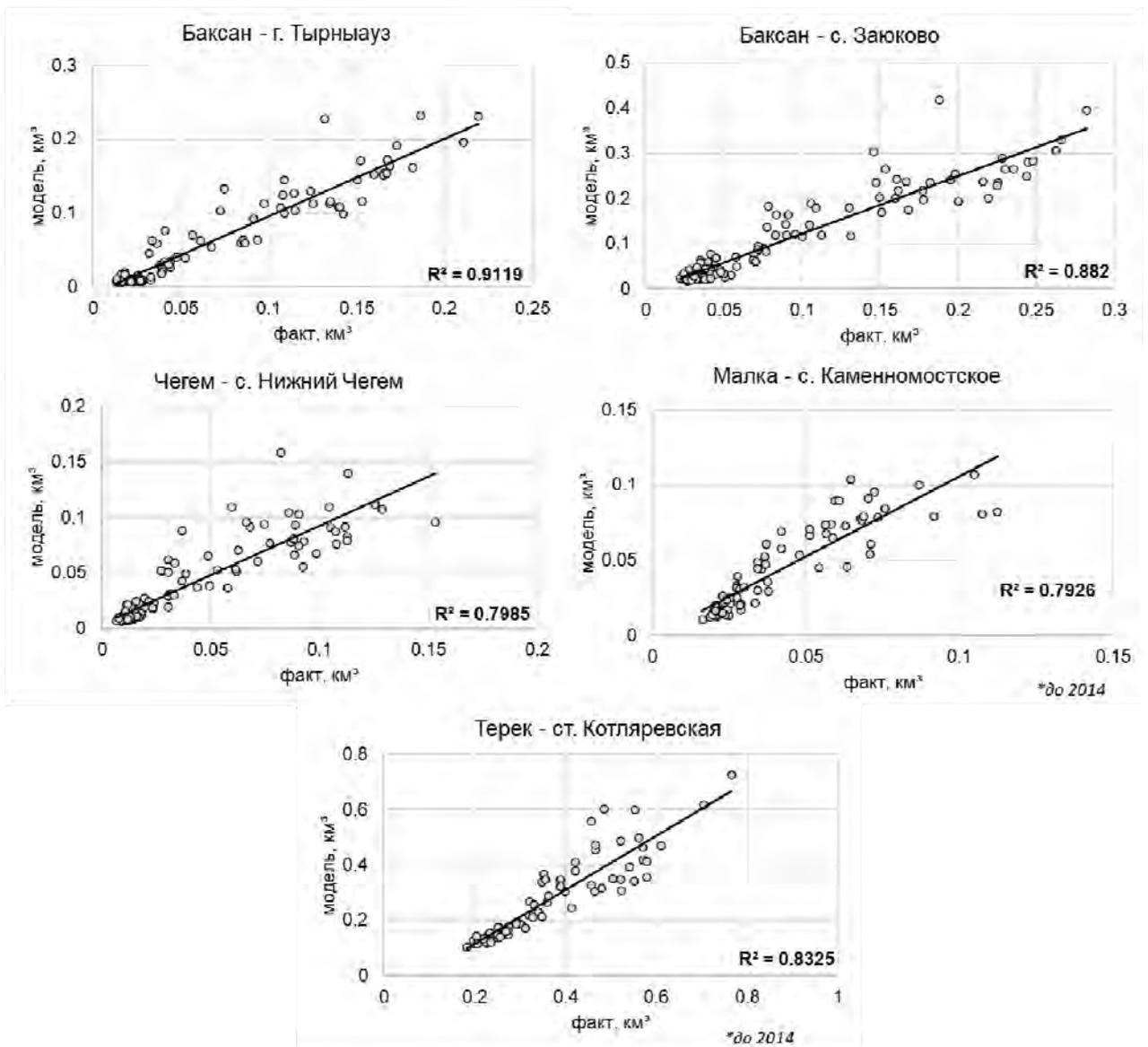


Рисунок 2.11 – Связь фактических и рассчитанных месячных объемов стока на различных гидрометрических постах в бассейне р. Терек за период валидации

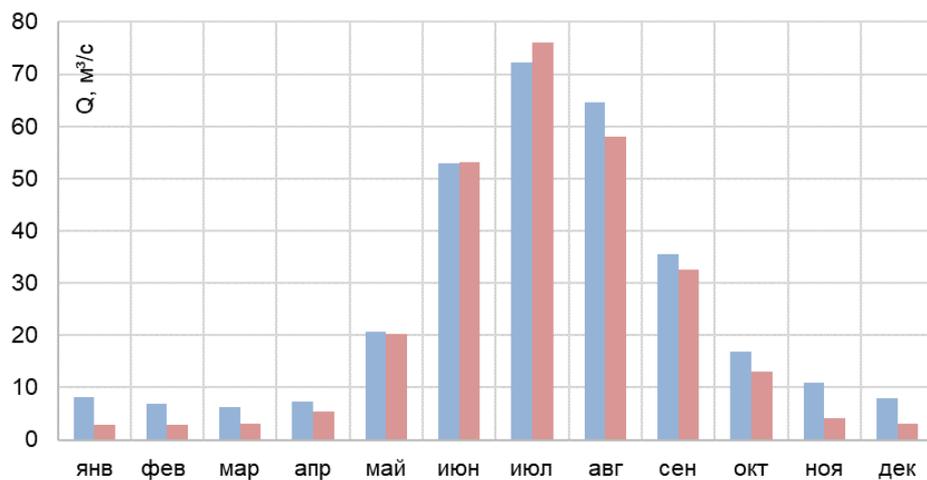


Рисунок 2.12 – Фактический и расчетный среднегодовой гидрограф р. Баксан (приток р. Терек) в створе г. Тырнауз за 2000–2017 гг.

При оценках систематических отклонений модельных гидрографов от фактических показательно сравнение типовых гидрографов, характеризующих внутригодовое распределение стока за многолетний период. Среднемноголетний гидрограф формируется усреднением значений среднемесячных расходов воды за многолетний период (рис. 2.12). В целом, получено хорошее совпадение внутригодового хода среднемесячных расходов воды по сравнению с фактическими данными, однако в зимние месяцы модель несколько превышает сток.

2.7. *Обобщение*

В данной главе был сделан обзор существующих моделей формирования стока, которые используются в бассейнах горных рек с высокой долей оледенения. 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 исходных данных. Поэтому для регионального моделирования стока в крупных бассейнах используются более простые подходы.

Была собрана и обработана информационная основа для адаптации модели формирования стока ECOMAG в бассейне р. Терек (гидрометеорологические данные, карты подстилающей поверхности, информация об оледенении). Выполнена схематизация бассейна, построена речная сеть.

Особенности генезиса формирования стока в бассейне р. Терек обусловили необходимость модификации ледникового блока модели ECOMAG. В связи со значительными различиями между альбедо поверхностей снега и льда, был введен параметр, отвечающий за отдельный коэффициент таяния льда (до модификации коэффициент таяния применялся единый для льда и снега). Тестовые расчеты с применением модифицированного ледникового блока показали, что наблюдается рост пиков во вторую половину летнего периода (июль–октябрь).

Произведена калибровка и валидация модели, которые по критериям качества (NSE, BIAS) показали хорошие и удовлетворительные результаты моделирования.

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

3.1. Валидация модели по спутниковым данным о покрытости водосбора снегом

В качестве дополнительного источника для валидации модели использовались данные о снежном покрове со снимков спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) – одного из инструментов спутников серии EOS Terra и Aqua [Justice et al., 2002], запущенных в 2000 г. MODIS имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах. Пространственное разрешение снимка для дешифрирования информации о снежном покрове составляет 500 м, повторяемость съемки одной территории 1–2 раза в сутки. В данном исследовании возможности использования дополнительной информации о снежном покрове со снимков MODIS Aqua и Terra были рассмотрены на примере выдающегося по водности 2017 г. Маски покрытости снегом по данным спутников MODIS с суточным шагом были предоставлены А. Гафуровом и получены по разработанной им оригинальной методике [Gafurov, Vardossy, 2009].

Программный комплекс ЕСОМАГ имеет блок, который формирует выдачи отдельных характеристик, определяющих формирование стока, для каждого элементарного водосбора. Так, например, по результатам расчета строятся карты пространственного распределения снежного покрова (% покрытости элементарного водосбора) за любой выбранный день в пределах исследуемой территории. Для валидации модели формирования стока использовались результаты расчета за первое число каждого месяца 2017 г. и сравнивались с данными о покрытости снегом MODIS спутников Terra и Aqua (ограничены бассейном р. Баксан) (рис. 3.1). В целом, модель корректно имитирует внутригодовой ход изменения снежного покрова – максимум наблюдается в феврале, затем постепенное снижение с минимумом в августе, и далее увеличение степени покрытости до декабря. При этом в весенние месяцы покрытость снегом по результатам моделирования выше, чем по данным MODIS, что свидетельствует о том, что данных метеорологических станций, расположенных в долине р. Баксан, недостаточно для воспроизведения покрытости снегом в период таяния в боковых долинах со сложными орографическими условиями. Результаты моделирования о покрытости снегом на конец августа хорошо совпадают с данными MODIS и в целом соответствуют среднемуголетнему положению климатической снеговой линии.

Стоит отметить, что данные по результатам моделирования отображаются по удельным водосборам, средняя площадь которых 9.9 км^2 , и внутри удельного водосбора

все модельные характеристики осреднены, а площадь пиксела космического снимка 0.25 км². В связи с этим прямое сравнение площадей распространения снежного покрова при такой схематизации модельных водосборов некорректно, и этот метод валидации позволяет лишь косвенно оценить качество моделирования.

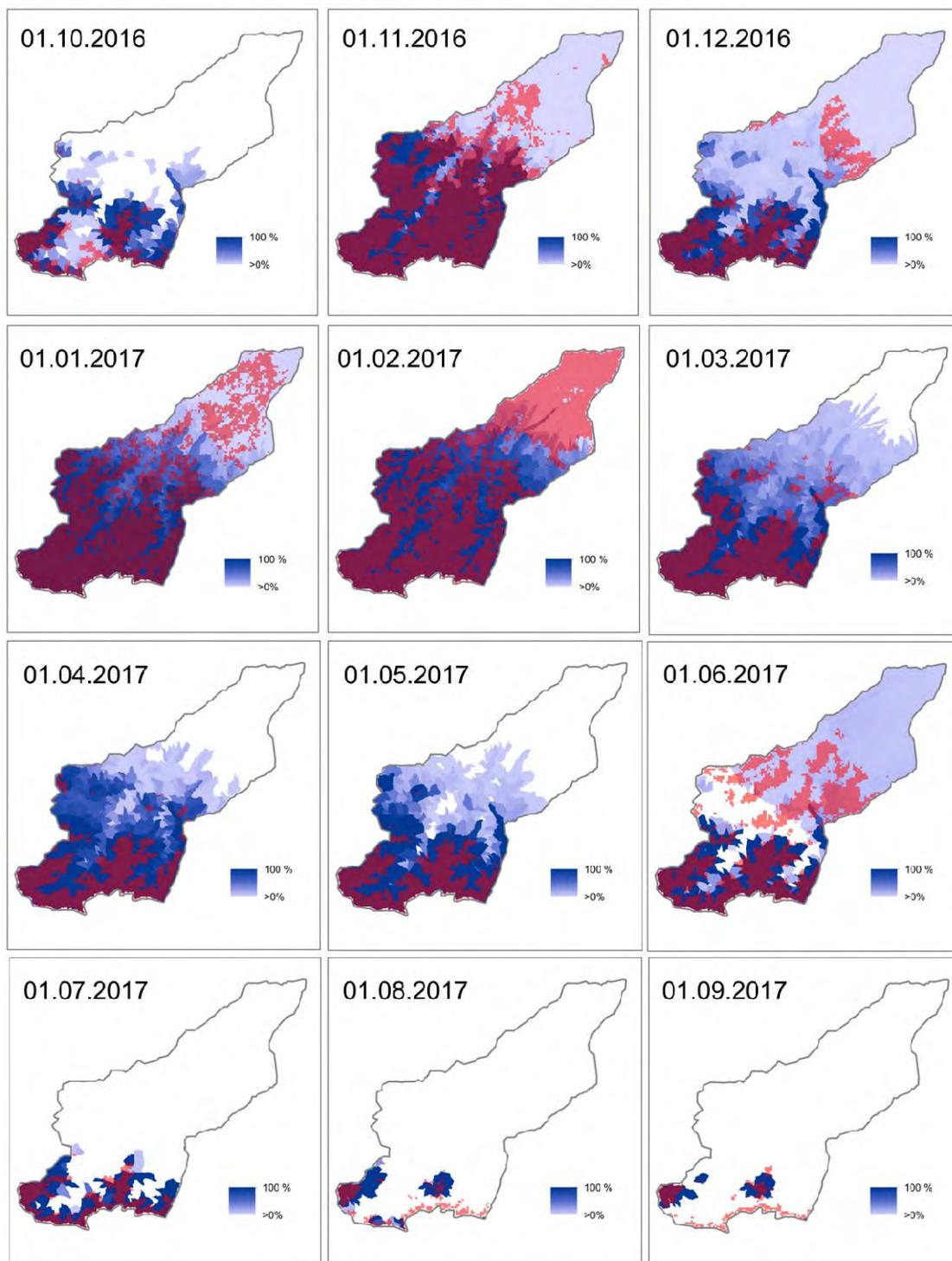


Рисунок 3.1 – Пространственное распределение снежного покрова в пределах бассейна р. Баксан в 2017г.: красный цвет – данные MODIS, синий – результаты моделирования (% покрытости элементарного водосбора) (обработка данных MODIS предоставлена Гафуровым Абдором [Gafurov, Bardossy, 2009])

3.2. *Валидация модели на основе данных об абляции опорных ледников*

Результаты масс балансовых исследований опорных ледников Центрального Кавказа – Джанкуат и Гарабаши (рис. 3.2), также могут быть использованы для валидации модели формирования стока.



Рисунок 3.2 – Опорные ледники Центрального Кавказа – Гарабаши (сверху) и Джанкуат (снизу)

Фактические значения суммарного таяния (абляции) опорных ледников за 2000–2009 гг., полученные по данным Всемирной службы мониторинга ледников [WGMS, 2024] сравнивались с модельными значениями таяния снега и льда за период натурных наблюдений (май-сентябрь) в пределах элементарного водосбора, где расположен ледник (рис. 3.3). Для ледника Гарабаши получено хорошее совпадение смоделированных и фактических величин, расхождение составило -12% . Для ледника Джанкуат относительная ошибка значительно выше и составила в среднем за период -55% . Это объясняется тем, что ледник Джанкуат является долинным, а элементарный водосбор, в котором он расположен, отличается расчлененным рельефом с крутыми склонами и, соответственно, неравномерным распределением и таянием снежного покрова. В модели формирования стока всему элементарному водосбору задается одно значение высоты, соответствующее его геометрическому центру. 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. Ледник Гарабаши относится к ледниковому комплексу г. Эльбрус и отличается более пологим рельефом, чем ледник Джанкуат и средняя относительная ошибка для него значительно меньше.

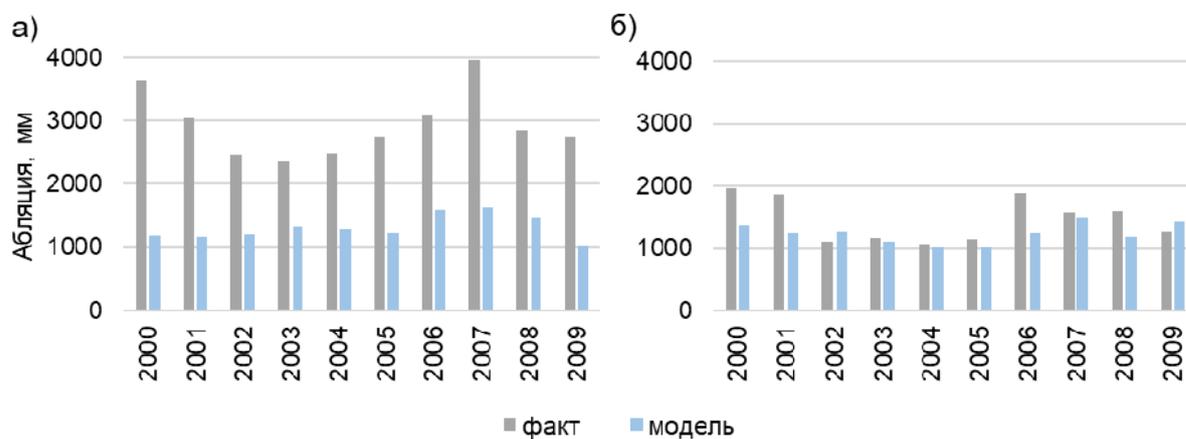


Рисунок 3.3 – Фактические и рассчитанные значения абляции ледников Джанкуат (а) и Гарабаши (б) за период 2000-2009 гг

В целом, как уже упоминалось в главе 2, для отдельно взятых ледников возможна разработка более детальных моделей таяния снега и льда в нивально-гляциальной зоне [Рец и др., 2011], лучше учитывающих особенности рельефа и более детально описывающих процессы таяния. Однако на настоящем этапе стыковка данных моделей с моделью формирования стока возможна только для частных подбассейнов небольшой площади.

3.3. Валидация модели на основе данных изотопного анализа

Дополнительным источником валидации модели формирования стока могут служить результаты изотопного анализа природных вод. Отчетливое различие изотопного состава талых ледниковых и снеговых вод и жидких осадков позволяет оценить соотношение этих компонентов к общему речному стоку. Расчленение гидрографа на генетические составляющие с помощью естественных трассеров широко применяется для бассейнов с ледниковым питанием [Ноег et al., 2000; Чижова и др., 2016]. Трассерами может являться общая минерализация или отдельные ионы, атомы, молекулы.

В течение 2020–2021 гг. с участием автора работы сериями по 5–6 раз за сезон с приблизительно равным интервалом, без привязки к определенным событиям, вдоль реки Баксан (рис. 3.4) осуществлялся отбор проб на изотопный анализ. В качестве трассера был использован тяжелый изотоп кислорода с атомной массой 18 ($\delta^{18}O$). В результате анализа

проб было произведено расчленение гидрографа реки Баксан на две составляющие: талый сток (талые воды сезонного снега и ледников) и дождевой сток [Хомякова и др., 2023]. В основе генетического расчленения гидрографа с использованием естественных трассеров лежит уравнение водного баланса. Одним из условий использования уравнения водного баланса является отсутствие в бассейне значимого притока вод другого генезиса с другим изотопным составом [Penna, Meerveld, 2019]. Данное условие можно считать выполненным, поскольку в данном бассейне доля грунтового питания в период половодья пренебрежимо мала [Чижова и др., 2014].

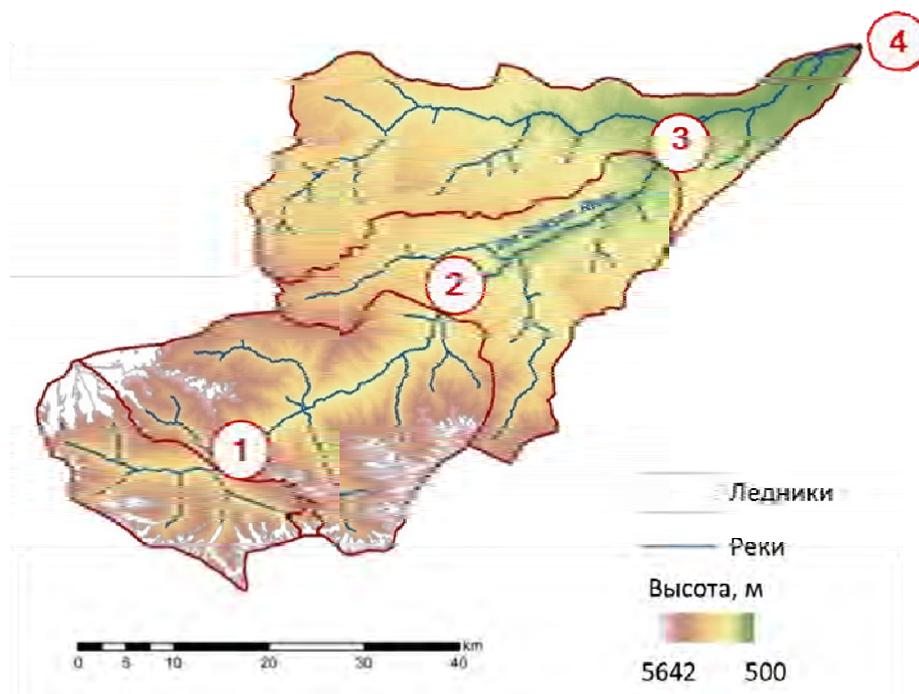


Рисунок 3.4 – Точки отбора проб на изотопный анализ из р. Баксан в различных створах: 1 – Эльбрус, 2 – Тырнаууз, 3 – Жанхотеко, 4 – Исламей

Модель формирования стока ECOMAG по имеющемуся набору модельных выдaч позволяет оценить составляющие стока только суммарно за месяц, поэтому валидация по изотопным данным в данном случае возможна в основном на качественном уровне. Для оценки генетических составляющих использовались модельные выдaчи по водоотдаче из снега (SnYield), осадкам на почву (Pr_soil) и испарению с почвы (Esoil) с каждого элементарного водосбора, вклад ледниковой составляющей учитывался по увеличению стока при подключении ледникового блока модели. Из всех дат пробоотбора были выбраны даты в середине месяца для сравнения с модельными результатами (рис. 3.5). Согласно проведенному сравнению, во-первых, видно, что модель отображает внутригодовую изменчивость источников питания – снижение доли талого стока, и, наоборот, увеличение дождевого стока в течение летнего периода. Например, в створе г. Тырнаууз доля талого стока по модельным данным в июне составляет около 70%, в то

время как в августе – около 35%. Во-вторых, доля талого стока закономерно уменьшается, а доля дождевого стока увеличивается от верхнего течения к нижнему. Так, в створе п. Эльбрус доля талого стока за период расчета варьируется от 40% в августе и до 90% в июне, а в створе п. Исламей – от 20 до 45% соответственно.

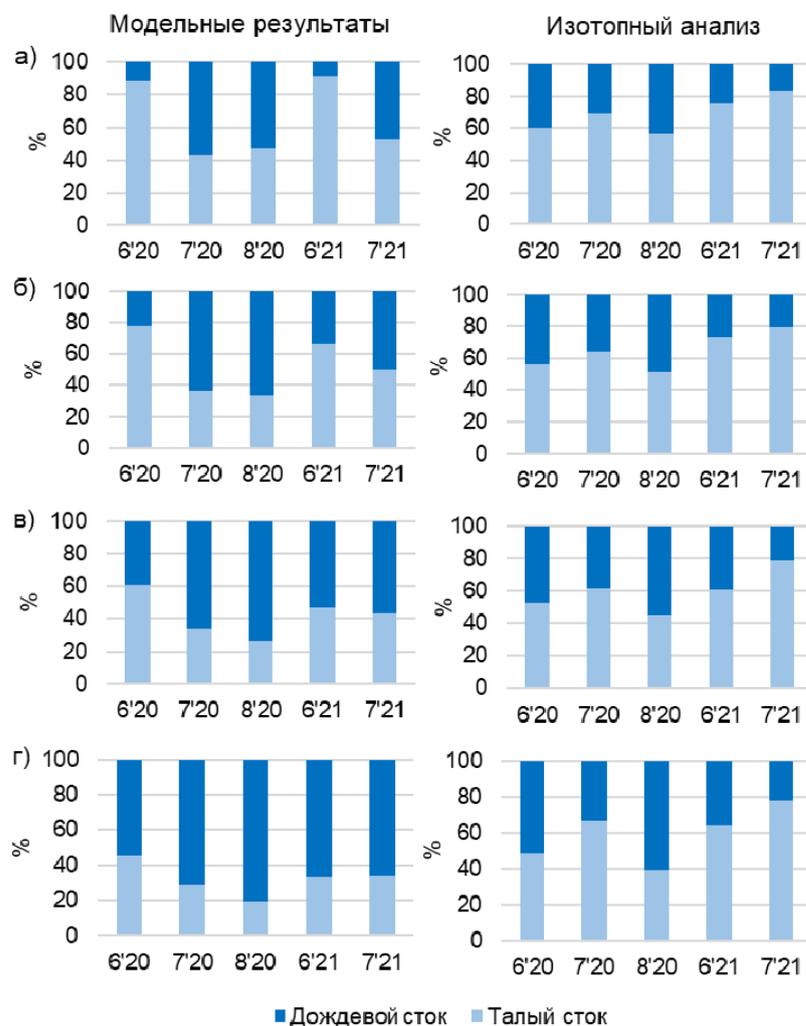


Рисунок 3.5 – Доли талых и дождевых вод за разные месяцы по данным модели и изотопного анализа для различных створов в 2020 – 2021 гг.: а – Эльбрус, б – Тырныауз, в – Жанхотеко, 5 – Исламей

По результатам моделирования дождевая составляющая в основном выше по сравнению с данными изотопного анализа, т.к. результаты моделирования отображают суммарное разделение стока на источники питания за месяц, включая все дождевые паводки. Также прослеживается различие времени наступления максимума вклада талого стока, по данным моделирования максимальная доля талого стока наблюдается в июне, однако, согласно изотопному анализу – в июле. Данный эффект, вероятно, связан с рядом таких факторов, как упрощенная интерполяция рельефа в центр элементарного водосбора, недоучет экспозиций склонов, затененности и других.

3.4. Моделирование стока с учетом прорывных паводков (на примере прорывного паводка из оз. Башкара 01.09.2017г.)¹

Высокогорные территории подвержены экстремальным гидрологическим событиям, исследование которых особенно важно в условиях деградации оледенения. Одним из примеров является бассейн реки Баксан, в том числе бассейн ее притока – р. Адыл-Су, где 1 сентября 2017 г. наблюдался прорыв системы приледниковых Башкаринских озер, который повлек за собой крупный паводок. В результате были разрушены автомобильная дорога, некоторые строения в долине реки, часть федеральной трассы, а также погибло три человека.

Исследуемое озеро Башкара расположено в верхнем течение р. Баксан, в долине р. Адыл-Су, в верховьях ее левого (основного) истока и размещается в кармане правой боковой морены одноименного крупного ледника Башкара. Озеро возникло в начале 1930-х гг., длительное время его с 3 сторон окружали ледовые берега. Помимо озера Башкара, у нижнего края ледника находится озеро Лапа, возникшее в 1990-х гг. [Petrakov et al., 2012] (рис. 3.6).

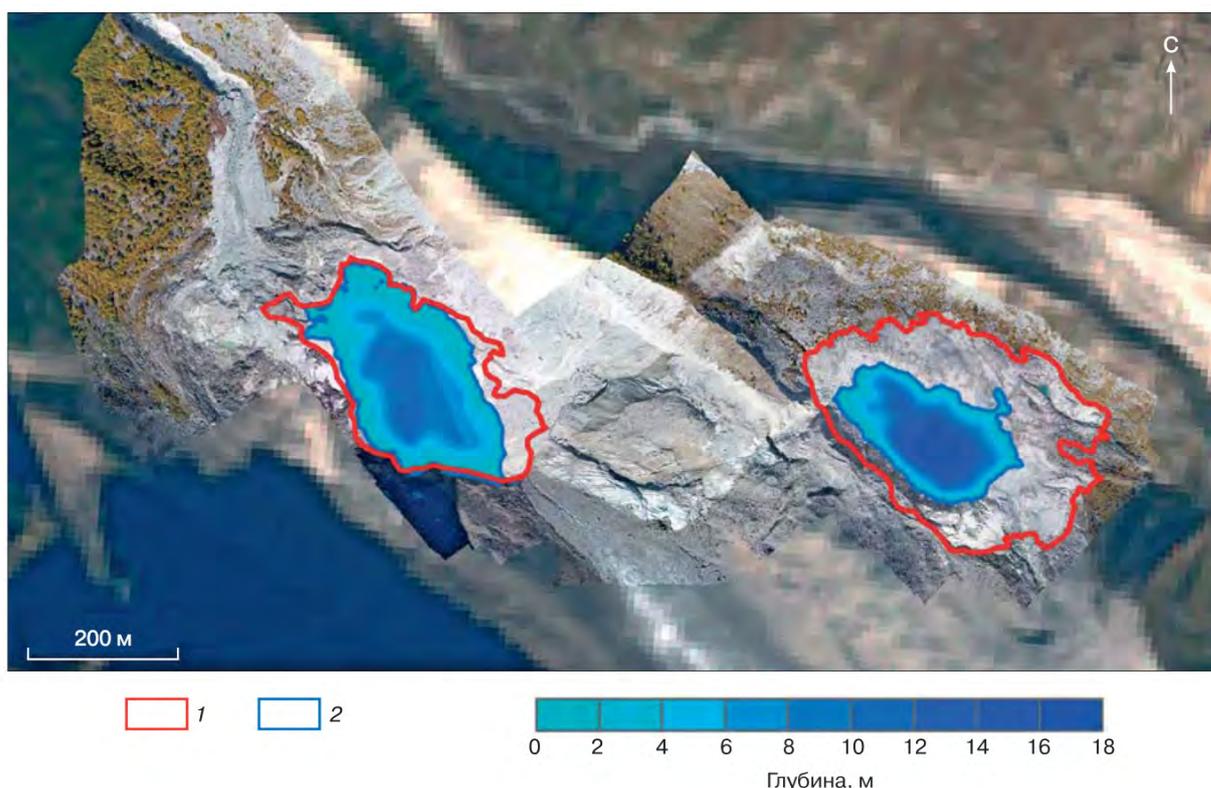


Рисунок 3.6 – Батиметрические карты озер Башкара (справа) и Лапа (слева) после прорыва. Контур озера: 1 – по данным космического снимка от 22.08.2017 г., 2 – по данным съемки квадрокоптера от 08.10.2017 г. [Черноморец и др., 2017]

¹ Раздел написан на основе статей [Корнилова и др., 2020; Kornilova et al., 2021]

В августе 1958 и 1959 гг., а также в октябре 1960 г. трижды происходили прорывы озера через гроты в ледовой стенке, ставшие причиной мощных селевых потоков по долине Адыл-Су [Ковалев, 1964]. На протяжении последующих 40 лет размеры озера постепенно увеличивались, по мере отступления ледовых берегов. В период 2009–2014 гг. уровень оз. Башкара был невысок и перелива воды через моренную дамбу не происходило, но в 2015–2017 гг. уровень резко повысился, перелив отмечался ежегодно и продолжительность его увеличивалась с 1 недели в 2015 г. до 2 месяцев в 2017 г. При полевых и аэровизуальных обследованиях отмечалась фильтрация воды через моренную дамбу [Chernomorets et al., 2018].

В ночь с 31 августа на 1 сентября 2017 г. произошло переполнение и прорыв озера Башкара. Непосредственным «триггером» прорыва озера стал аномальный ливень на фоне сильного переувлажнения горных пород. В ночь с 31 августа на 1 сентября 2017 г. после четырехсуточного периода дождливой погоды, завершившегося аномальным по интенсивности ливнем (всего около 100мм/8часов), прорвался и впоследствии размылся гребень перемычки. Уровень воды в основном озере упал на 15-17 м относительно предпрорывного, объем воды в нем уменьшился больше, чем на 3/4 - с более 1 млн. м³ до примерно 250 тыс. м³ [Chernomorets et al., 2018] (рис. 3.7).

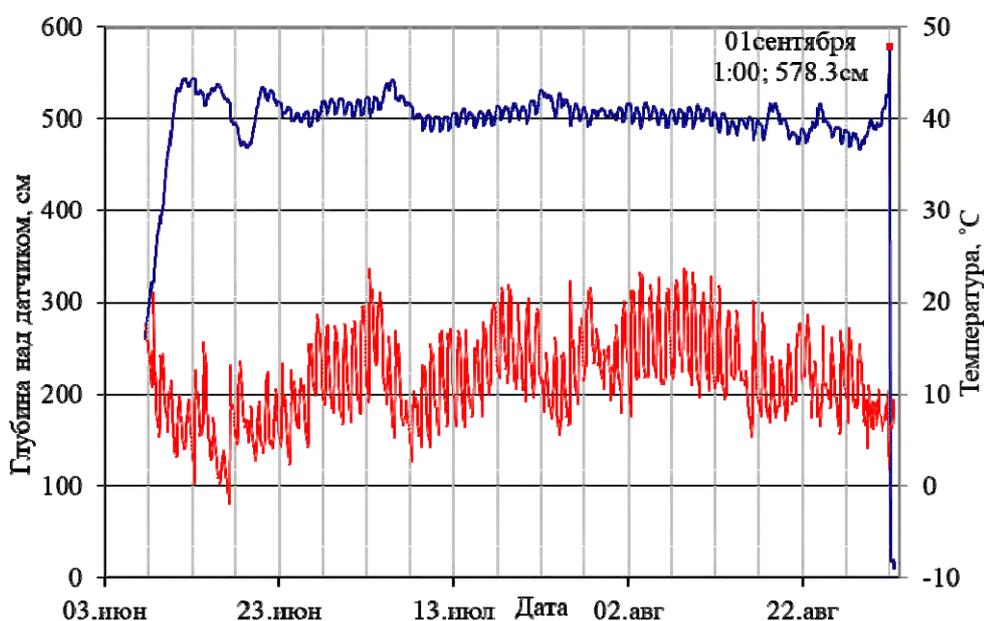


Рисунок 3.7 – Изменение уровня озера Башкара за период с 7 июня по 1 сентября 2017 г. по данным логгера «Keller»

Механизм прорыва был крайне сложным – прорывной сброс воды из оз. Башкара, возникший в результате обрушения морены верхнего озера, пошел по поверхности языка ледника Башкара, затем трансформировался при движении по нижнему озеру Лапа, и только потом начал двигаться по долине р. Адыл-Су [Chernomorets et al., 2018].

С целью детального исследования влияния прорывного паводка на сток реки Баксан в работе использовался комплекс моделей. На основе гидродинамической модели был реконструирован гидрограф прорыва и движение прорывного паводка (рис. 3.8). Полученный расход воды использовался в качестве входных данных для моделирования стока реки Баксан и оценки вклада прорывного паводка на основе модельного комплекса ЕСОМАГ. Таким образом, объединялись два модельных комплекса – гидродинамическая модель и модель формирования стока.

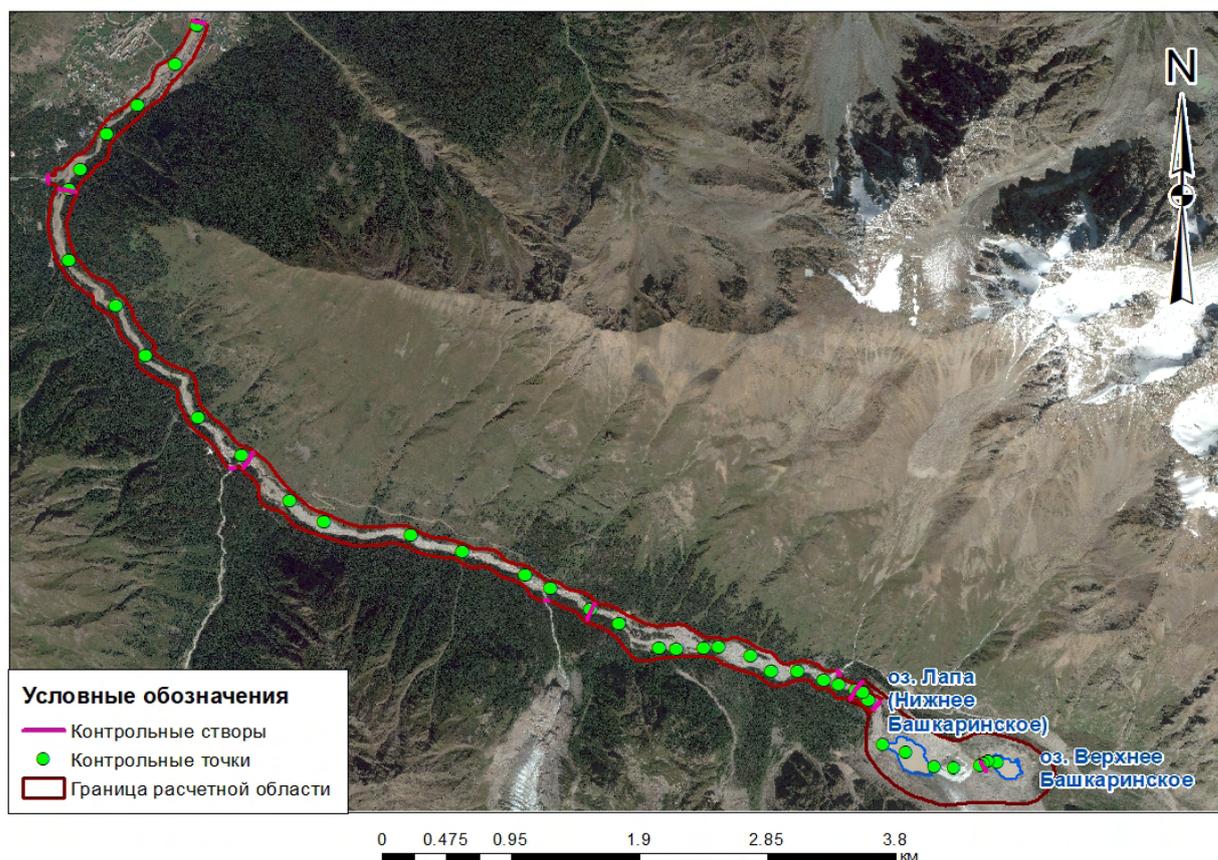


Рисунок 3.8 – Общая схема участка моделирования движения прорывного паводка в долине р. Адыл-Су на основе гидродинамической модели

Для гидродинамического моделирования в данной работе использовался российский программный комплекс STREAM_2D (авт. Беликов В.В. и др.) [Алексюк, Беликов, 2017], основанный на численном решении двумерных уравнений Сен-Венана в приближении мелкой воды с применением гибридных треугольно-четырёхугольных расчетных сеток с переменным шагом. Ранее сценарное моделирование прохождения прорывного паводка по долине р. Адыл-Су было проведено еще до прорыва озера [Petraikov et al., 2012] на основе программных комплексов «River» (предшественник современной версии STREAM_2D) [Belikov, Militeev, 1992] и FLO-2D [O'Brien et al., 1993]. После прорыва озера было также проведено сравнительное моделирование с расчетами на основе

программного комплекса RAMMS [Кидяева и др., 2018]. Ввиду большого объема воды, излившейся из озера, рассмотрение потока, как наносо-селевого паводка и водного паводка давало близкие значения времени добегающего, скоростей и глубин потока, зоны максимального затопления. Поэтому в нашей работе ввиду основных задач исследования, связанных с оценкой расходов воды на различных участках долины были проведены только расчеты движения водного потока без учета селевого компонента.

Исходными данными для применения гидродинамической модели для участка от озера Башкара до впадения р. Адыл-Су в Баксан являлись цифровые модели рельефа, полученные по результатам обработки данных спутника SPOT (разрешение – 3 м, дата съемки 01.08.2017 г.) и результаты батиметрических съемок озер Башкара и Лапа. Для задания коэффициентов шероховатости использовались результаты дешифрирования космического снимка методом автоматизированной классификации k-means (k-среднего) на основе программного комплекса ERDAS Imagine [Kanungo, Mount, Netanyahu, 2002] и данные специальных измерений, выполненных на леднике Джикиуганкез в проекте РФФИ («Опасные гляциальные процессы на этапе современного сокращения оледенения» № 09-05-00934_a), для оценки коэффициентов шероховатости при движении по ледовым руслам,

Было построено две расчетных сетки – на систему озер и ледник Башкара (верхняя) и на долину реки Адыл-Су (нижняя). Для русел рек и участка прорана задавалась прямоугольная сетка, треугольная – на остальную модельную область. В цифровую модель рельефа, построенную по данным до прорыва озера, были внесены значения абсолютных отметок с учетом рельефа сформировавшегося прорана (ширина прорана составляет около 15–20 м, глубина – 30–40 м). По данным логгера-уровнемера, находившегося летом 2017 г. в оз. Башкара, была задана начальная плоскость, соответствующая предпрорывному уровню озера – около 2672 м. Также на период моделирования был подключен блок осадков, который предусмотрен в программном комплексе STREAM_2D, ведь в данном случае дождь являлся одним из главных факторов прорыва (около 10 мм/час), а также учитывался боковой приток [Корнилова и др., 2020; Kornilova et al., 2021].

При запуске расчета при заданных условиях, вода начинала выливаться через проран по направлению понижения абсолютных отметок рельефа, модельный гидрограф излива оценивался в створе прорана, а также в других створах ниже по течению включая створы на выходе из оз.Лапа, Джантуган, Шхельда, Эльбрус и в выходном створе у окраины п.Эльбрус. Калибровка гидродинамической модели для долины р. Адыл-Су выполнялась варьированием коэффициента шероховатости при сопоставлении времени добегающего

волны прорывного паводка на основе опросов местных жителей и моделирования. По опросным сведениям, лобовая волна паводка достигла ущелья Шхельды (6.4 км ниже истока из оз.Башкара) в районе 01:20 ночи, поселка Эльбрус (10 км ниже истока) – не позднее 01:30 ночи (таблица 3.1).

По результатам моделирования, при движении по долине р. Адыл-Су волна паводка расплывается – значение максимального расхода воды (относительно фонового) уменьшается, треугольная форма гидрографа сменяется на более пологую (рис. 3.9), время между началом роста расходов и пиком гидрографа в створе возрастает, также увеличивается и продолжительность паводка. В поселке Эльбрус пик паводка по результатам моделирования наблюдается через 40 минут от начала прорыва, максимальный расход составляет 320 м³/с [Корнилова и др., 2020; Kornilova et al., 2021].

Таблица 3.1 – Сопоставления времени прохождения волны прорывного паводка на основе опросов местных жителей и моделирования

		Значение шероховатости			Время, ч	
		Русло	Пойма	Залесенная пойма	а/л Шхельда	п. Эльбрус
Опрос					1:20	1:30
Модель	Вариант 1	0.02	0.03	0.035	1:16	1:25
	Вариант 2	0.05	0.06	0.07	1:21	1:32
	Вариант 3	0.045	0.05	0.055	1:20	1:30

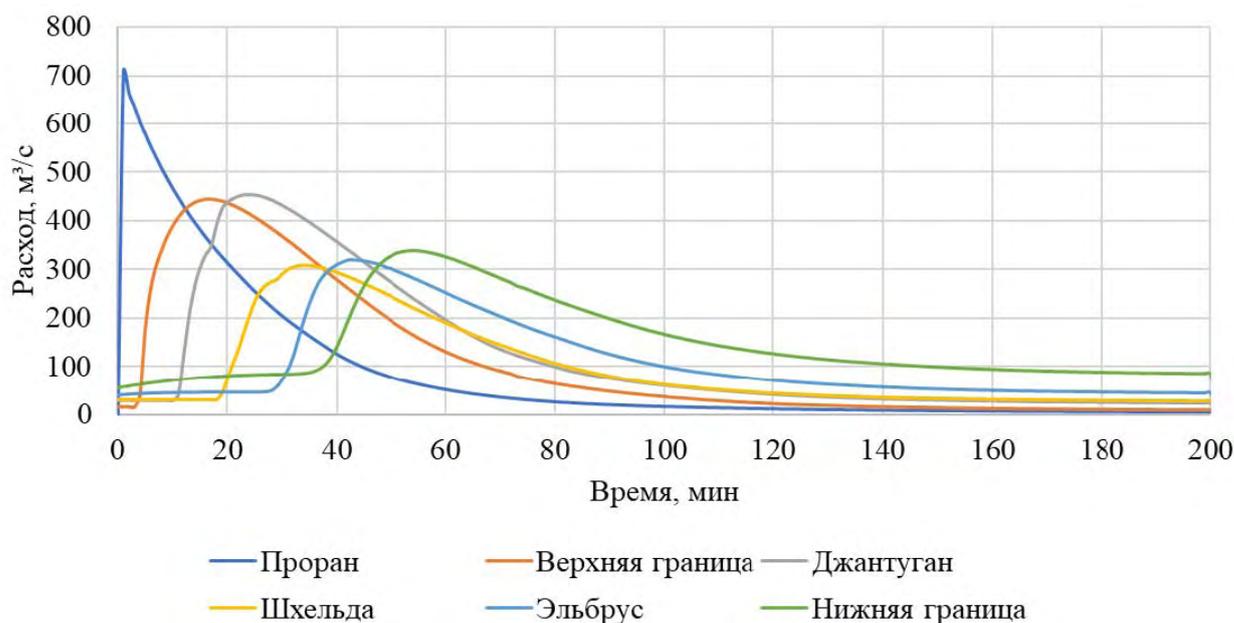


Рисунок 3.9 – Трансформация волны прорывного паводка по долине Адыл-Су по результатам гидродинамического моделирования

Для того чтобы проследить, как прорыв Башкаринских озер повлиял на сток р. Баксан, в модель формирования стока ЕСОМАГ был введен дополнительный входной створ, расположенный ниже оз. Башкара, в котором задавался среднесуточный расход воды за период прорывного паводка, полученный по данным гидродинамической модели. В результате модель формирования стока хорошо воспроизвела пиковый расход в створах гидропостов р. Баксан - Тырнауз и Заюково (рис. 3.10б), без учета прорывного паводка данный пик в модели формирования стока не воспроизводился (рис. 3.10а).

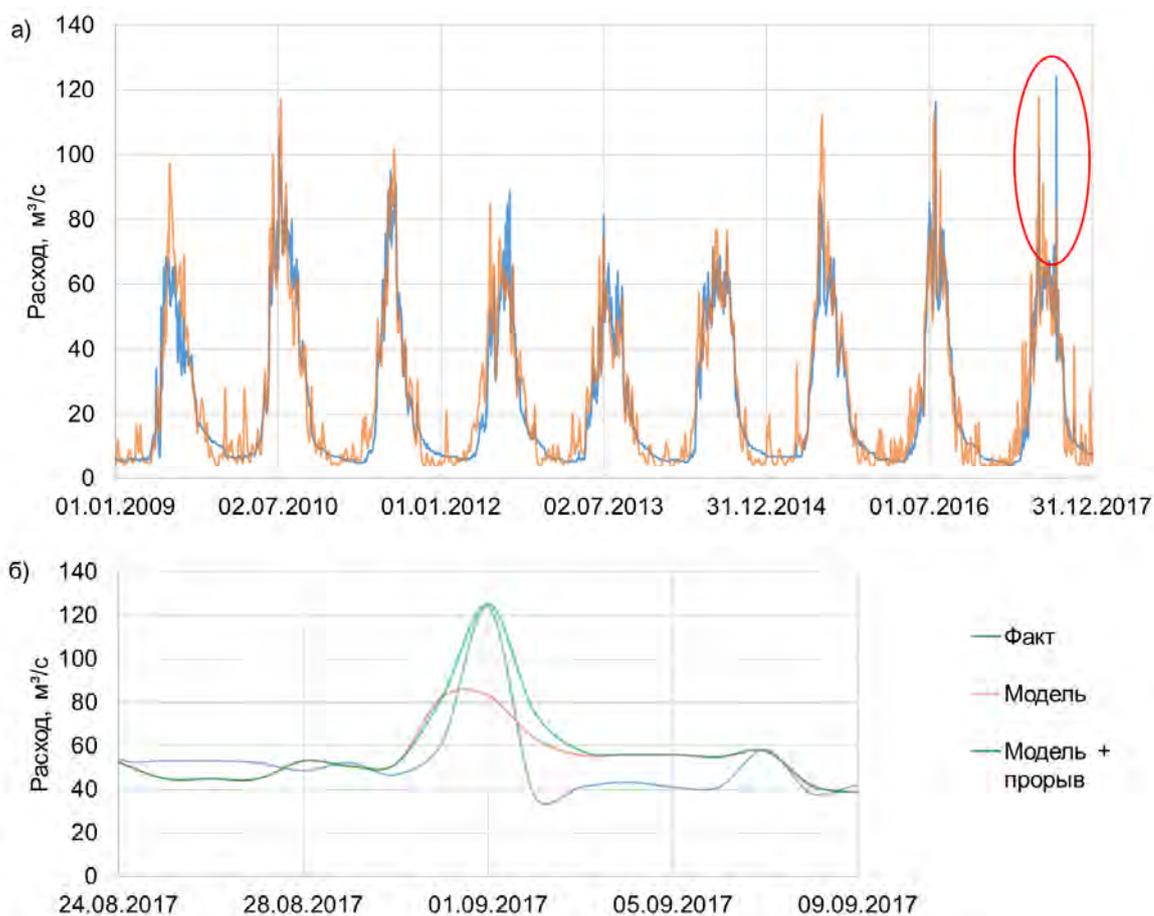


Рисунок 3.10 – Фактические и смоделированные гидрографы на основе модели формирования стока ЕСОМАГ на р. Баксан – г.п. Тырнауз: (а) моделирование стока за 2009–2017 гг., в красном круге — прорывной паводок 01.09.2017; (б) моделирование стока за август–сентябрь 2017 г. с учетом расходов прорывного паводка 01.09.2017 г., смоделированных на основе модели STREAM_2D

На рис. 3.11 показан вклад прорывного паводка, фонового стока и осадков в пиковый расход на реках Адыл-Су и Баксан, оцененный по модели формирования стока ЕСОМАГ. На прорывной паводок приходится почти весь расход воды ниже по течению от озер, после впадения р. Адыл-Су в р. Баксан вклад прорывного паводка снижается и становится равным вкладу осадков на расстоянии 40 км от места прорыва.

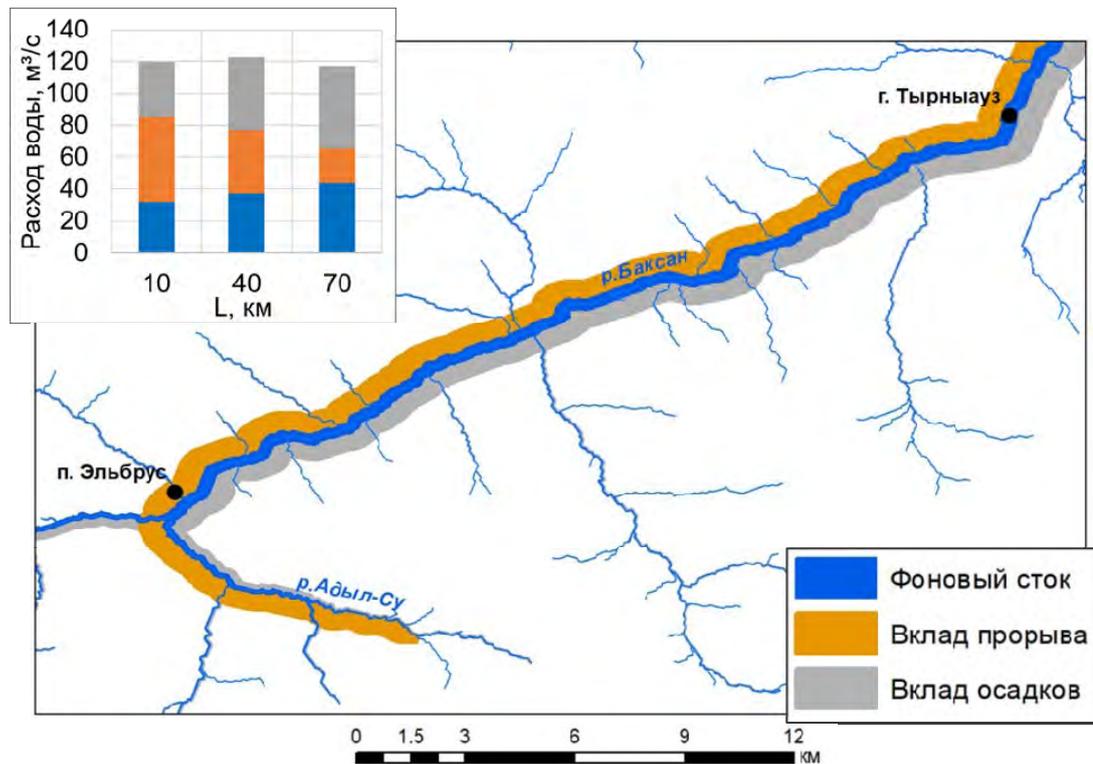


Рисунок 3.11 – Распространение влияния прорывного паводка на сток р. Баксан

3.5. *Обобщение*

Выполнены обширные исследования по оценке возможностей учета в ИМК ЕСOMAG особенностей высокогорных территорий.

Проведена валидация модели по спутниковым данным спектро радиометра MODIS о покрытости водосбора снегом, которая показала, что модель корректно имитирует внутригодовой ход изменения снежного покрова – максимум наблюдается в феврале, затем постепенное снижение с минимум в августе, и далее увеличение степени покрытости до декабря.

Валидация модели по данным масс-балансовых исследований опорных ледников Центрального Кавказа (Джанкуат и Гарабаши), показала, что в реальных условиях процессы таяния и распределения снега и льда в столь расчлененном рельефе намного сложнее, возникает систематическая ошибка – заниженные относительно фактических данных модельные результаты. Наилучшее совпадение получено для ледника Гарабаши, средняя относительная ошибка составляет 12%.

По результатам валидации модели формирования стока на основе результатов изотопного анализа видно, что, во-первых, модель отображает внутригодовую изменчивость источников питания – снижение доли талого стока, и, наоборот, увеличение дождевого стока в течение летнего периода. Во-вторых, доля талого стока закономерно уменьшается, а доля дождевого стока увеличивается от верхнего течения к нижнему.

Кроме того, была 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, после впадения р. Адыл-Су в р. Баксан вклад прорывного паводка снижается и становится равным вкладу осадков на расстоянии 40 км от места прорыва.

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

4.1. Структура экспериментов

Суть численных экспериментов состояла в оценке чувствительности характеристик стока к изменению различных входных условий таких, как оледенение, количество осадков, температура воздуха. Данные эксперименты позволяют выявить вклад различных факторов в изменения характеристик стока и возможный диапазон этих изменений. Расчет производился по данным для периода с 2010 по 2020 гг. с учетом модификации различных входных условий по методу “delta-change”, когда вводятся постоянные поправки к входным условиям на период расчета и оценивается изменение результатов моделирования (в данном случае, расходов воды). Данный метод впервые был предложен в работе [Кучмент и др., 1990] для анализа чувствительности гидрологической системы с помощью физико-математических моделей. Основным преимуществом метода “delta-change” является возможность уменьшения неопределенности расчетных данных климатических моделей за счет задания в качестве граничных условий в гидрологическую модель преобразованных фактических наблюдений.

Оценки проводились на примере высокогорной части бассейна р. Баксан, для которой характерно наибольшее оледенение (оледенение на склонах горы Эльбрус и ледники Главного Кавказского хребта). Были выполнены оценки изменений расходов воды по постам р. Баксан – г. Тырнауз и р. Баксан – с. Заюково при изменении следующих входных данных:

1. Сокращение современной площади ледников (группа сценариев *led*): 75%, 50%, 25% от современной площади оледенения (сценарии *led75*, *led50*, *led25*), отсутствие ледников (сценарий *led0*).
2. Изменение фактического количества осадков (группа сценариев *pre*): *pre+5* (10, 20) % – увеличение количества осадков на 5(10, 20) %, *pre-5* (10, 20) – уменьшение количества осадков на 5 (10, 20) %.
3. Изменение фактической температуры воздуха (группа сценариев *temp*): *temp* – фактические значения температуры воздуха (по данным метеостанций), *temp+2* (4, 6) °С – увеличение температуры воздуха на 2 (4, 6) °С.

4.2. Оценка чувствительности характеристик стока к изменению площади оледенения²

² Раздел написан на основе статьи [Корнилова и др., 2023]

В рамках эксперимента для оценки изменения стока в связи с возможными изменениями оледенения воспроизводились следующие сценарии: *led* – современная площадь оледенения (по данным RGI), *led75* – 75% от современной площади оледенения, *led50* – 50% от площади оледенения, *led25* – 25% от площади оледенения, и *led0* – отсутствие ледников. Относительные изменения доли ледников принимались одинаковыми для всех элементарных водосборов. Общее положение снеговой линии определялось начальными условиями в 2010 г., т.е. в ходе эксперимента оценивалось только уменьшение таяния льда за счет изменения площади ледника. В данном эксперименте дополнительно был рассмотрен высокогорный пост в п. Эльбрус на р. Баксан.

Результаты моделирования (таблица 4.1) показывают, что изменение площади оледенения в большей мере влияет на сток в высокогорной части бассейна, вниз по течению влияние ослабевает. Например, при уменьшении оледенения на 50% (сценарий *led50*) относительно современного состояния, общий объем стока за расчетный период в п. Эльбрус уменьшился на 5.7%, в г. Тырныауз – на 5.1%, в то время как в с. Заюково изменение составило 3.1%. При отсутствии ледников (сценарий *led0*) сток уменьшился на 11%, 9.9% и 6.0% в п. Эльбрус, г. Тырныауз и с. Заюково соответственно [Корнилова и др., 2023].

Таблица 4.1 – Характеристики стока р. Баксан и их изменение в зависимости от расчетного сценария (1* – п. Эльбрус, 1 – г. Тырныауз, 2 – с. Заюково) [Корнилова и др., 2023]

Сценарий	Общий сток за период, км ³			Изменение стока, %			Максимальный расход за период, м ³ /с			Изменение максимального расхода, %		
	1*	1	2	1*	1	2	1*	1	2	1*	1	2
<i>led</i>	3.1	7.6	14.0				80.2	197	277			
<i>led75%</i>	3.0	7.5	13.8	-2.9	-2.6	-1.6	80.2	196	277	0.0	-0.3	-0.3
<i>led50%</i>	2.9	7.3	13.5	-5.7	-5.1	-3.1	80.0	195	276	-0.2	-0.6	-0.6
<i>led25%</i>	2.8	7.1	13.3	-8.4	-7.5	-4.6	79.8	195	275	-0.4	-0.9	-0.9
<i>led0%</i>	2.7	6.9	13.1	-11	-9.9	-6.0	79.8	194	274	-0.4	-1.3	-1.3

Максимальные расходы воды р. Баксан также откликаются на изменение площади оледенения. Но в связи с тем, что максимальные расходы в данном регионе формируются, главным образом, не за счет ледникового стока, их изменение минимально. Например, при сценарии *led0*, отсутствие ледников, изменение максимального расхода составит всего -0.4% для створа в п. Эльбрус и 1.3% для створов в г. Тырныауз и с. Заюково.

Изменение оледенения преимущественно влияет на расходы воды в июле–октябре, на которые приходится период интенсивного таяния уже открытых от снега ледников (рис. 4.1). На рисунке 4.1 видно, что наибольшее влияние площади оледенения наблюдается в августе и сентябре. Например, при сценарии led50 среднемесячный расход воды р. Баксан в августе уменьшился на 17, 13 и 9%, в сентябре – на 16, 12 и 8% по данным гидропостов п. Эльбрус, г. Тырнауз и с. Заюково, соответственно. При отсутствии оледенения (сценарий led0) сток в августе-сентябре в среднем уменьшается на 31, 25 и 16% по данным гидропостов п. Эльбрус, г. Тырнауз и с. Заюково, соответственно [Корнилова и др., 2023].

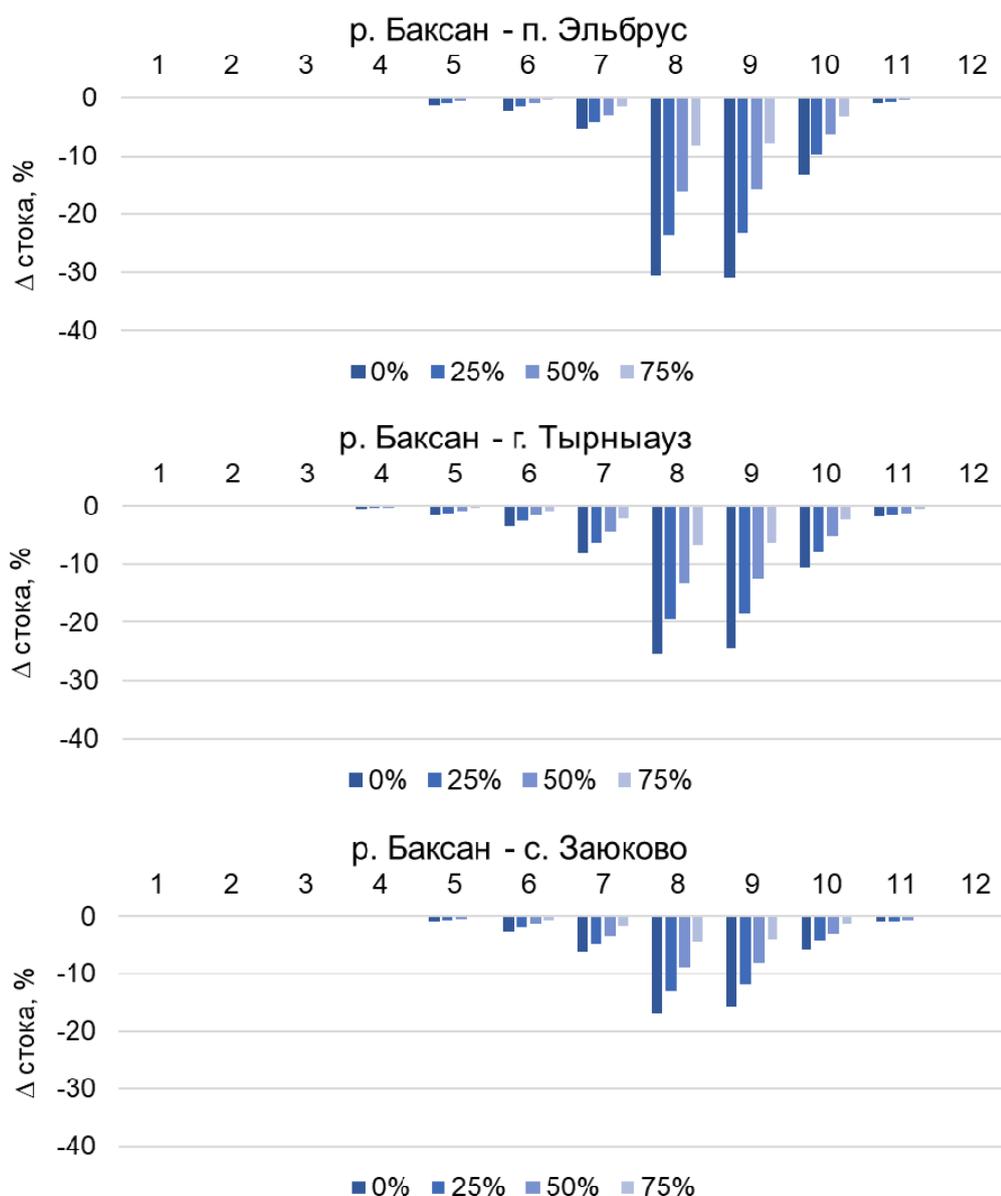


Рисунок 4.1 – Аномалии осредненных за период с 2010 по 2020 гг. среднемесячных гидрографов по результатам численного эксперимента при изменениях доли оледенения по сравнению с базовым сценарием при современном оледенении

4.3. Оценка чувствительности характеристик стока к изменению количества осадков

Изменение количества осадков также приведет к значительным изменениям объема стока. В рамках эксперимента для оценки изменения стока в связи с возможными изменениями количества осадков воспроизводились следующие сценарии: *pre* – фактическое количества осадков (по данным метеостанций), *pre+5* (10, 20) % – увеличение количества осадков на 5 (10, 20) %, *pre-5* (10, 20) % – уменьшение количества осадков на 5 (10, 20) %.

Согласно результатам численного эксперимента, сток будет одинаково реагировать на увеличение количества осадков в обоих створах, независимо от их расположения, и его изменение будет пропорционально изменению количества осадков (таблица 4.2). Например, при увеличении количества осадков на 10% объем стока также увеличится на 9.5–10% в обоих створах. Однако, изменение максимальных расходов воды за период будет немного выше, чем изменение количества осадков. Так, при увеличении количества осадков на 20% максимальный расход возрастет на 25% в обоих створах. Это связано с тем, что основной максимум годового стока обычно формируется в результате наложения дождевых паводков на основную волну половодья (снеготаяния), то есть, в данном случае, происходит наложение двух факторов – изменение зимних и летних осадков, увеличенных на 20%. С одной стороны, интенсивно тает снег, сформированный зимними твердыми осадками, с другой стороны, выпадают жидкие летние осадки.

Таблица 4.2 – Характеристики стока р. Баксан и их изменение в зависимости от расчетного сценария (1 – г. Тырныауз, 2 – с. Заюково).

Сценарий	Общий сток за период, км ³		Изменение стока, %		Максимальный расход за период, м ³ /с		Изменение максимального расхода, %	
	1	2	1	2	1	2	1	2
<i>pre</i>	7.6	14.0			197	277		
<i>pre+5%</i>	8.0	14.6	4.9	4.7	209	295	6.4	6.4
<i>pre+10%</i>	8.4	15.3	9.9	9.5	222	313	12.7	12.7
<i>pre+20%</i>	9.2	16.7	20.0	19.2	246	348	25.0	25.3
<i>pre-5%</i>	7.3	13.3	-4.9	-4.6	184	260	-6.4	-6.3
<i>pre-10%</i>	6.9	12.7	-9.7	-9.2	171	241	-13.2	-13.0
<i>pre-20%</i>	6.2	11.5	-19.1	-18.1	148	209	-24.8	-24.8

Также стоит отметить, что наибольшие изменения объемов стока наблюдаются в период с мая по октябрь, когда ожидаются интенсивные снеготаяние и паводки (рис. 4.2). В летние месяцы изменение среднемесячного расхода воды может достигнуть 20–30% при

сценарии $pre+(-)20\%$, в то время как в зимний период изменение стока близко к нулю в связи с тем, что осадки выпадают в твердом агрегатном состоянии.

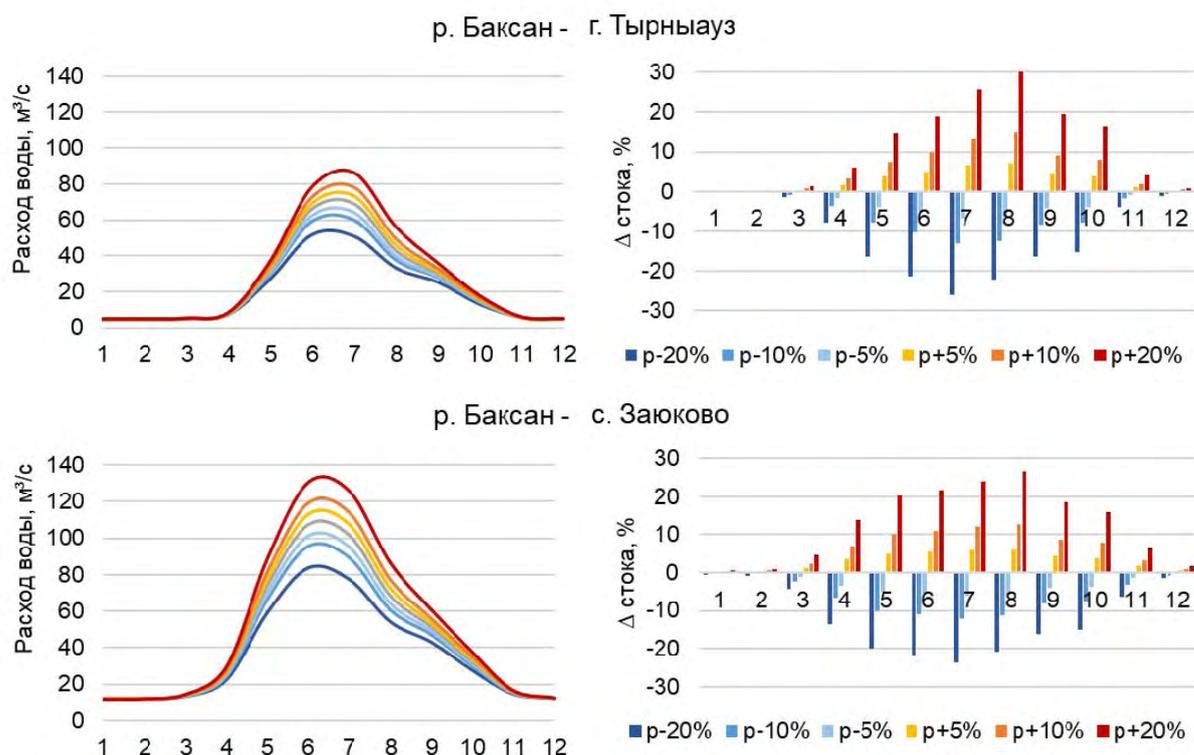


Рисунок 4.2 – Осредненные за период с 2010 по 2020 г. среднемесячные гидрографы по результатам численного эксперимента при изменениях количества осадков (слева) и их аномалии по сравнению с базовым сценарием (pre) (справа)

4.4. Оценка чувствительности характеристик стока к изменению температуры воздуха

Динамика температуры воздуха, согласно современным тенденциям, оказывает влияние не только на изменение годового стока, но и на внутригодовое распределение стока. Для оценки чувствительности характеристик стока к изменению температуры воздуха были разработаны следующие сценарии: $temp$ – фактические значения температуры воздуха (по данным метеостанций), $temp+2$ (4, 6) °C – увеличение температуры воздуха на 2 (4, 6) °C.

Результаты численного эксперимента (таблица 4.3) показывают, что влияние изменения температуры воздуха на сток при движении вниз по течению ослабевает. Например, при увеличении температуры воздуха на 4°C общий объем стока за период эксперимента увеличится на 14.7 и 8% в створе г. Тырныауз и с. Заюково, соответственно. Данный эффект связан с тем, что увеличение температуры воздуха, в первую очередь, будет оказывать влияние на таяние снежного покрова, преимущественно расположенном в высокогорной части бассейна. Однако, максимальный расход воды при увеличении

температуры воздуха будет уменьшаться. Так, при реализации сценария $temp+4^{\circ}C$ максимальный расход уменьшится на 19.9 и 14.8% в створе г. Тырнауз и с. Заюково соответственно. Дело в том, что увеличение температуры воздуха приведет не только к более раннему снеготаянию и активизации таяния ледников, но и к уменьшению твердых осадков, а также к таянию снежного покрова в зимний период.

Таблица 4.3 – Характеристики стока р. Баксан и их изменение в зависимости от расчетного сценария (1 – г. Тырнауз, 2 – с. Заюково).

Сценарий	Общий сток за период, км ³		Изменение стока, %		Максимальный расход за период, м ³ /с		Изменение максимального расхода, %	
	1	2	1	2	1	2	1	2
<i>temp</i>	7.64	14.0			197	277		
<i>temp+2°C</i>	8.10	14.4	6.0	3.2	180	256	-8.7	-7.6
<i>temp+4°C</i>	8.76	15.1	14.7	8.0	157	236	-19.9	-14.8
<i>temp+6°C</i>	9.50	15.8	24.3	13.0	157	233	-20.0	-16.0

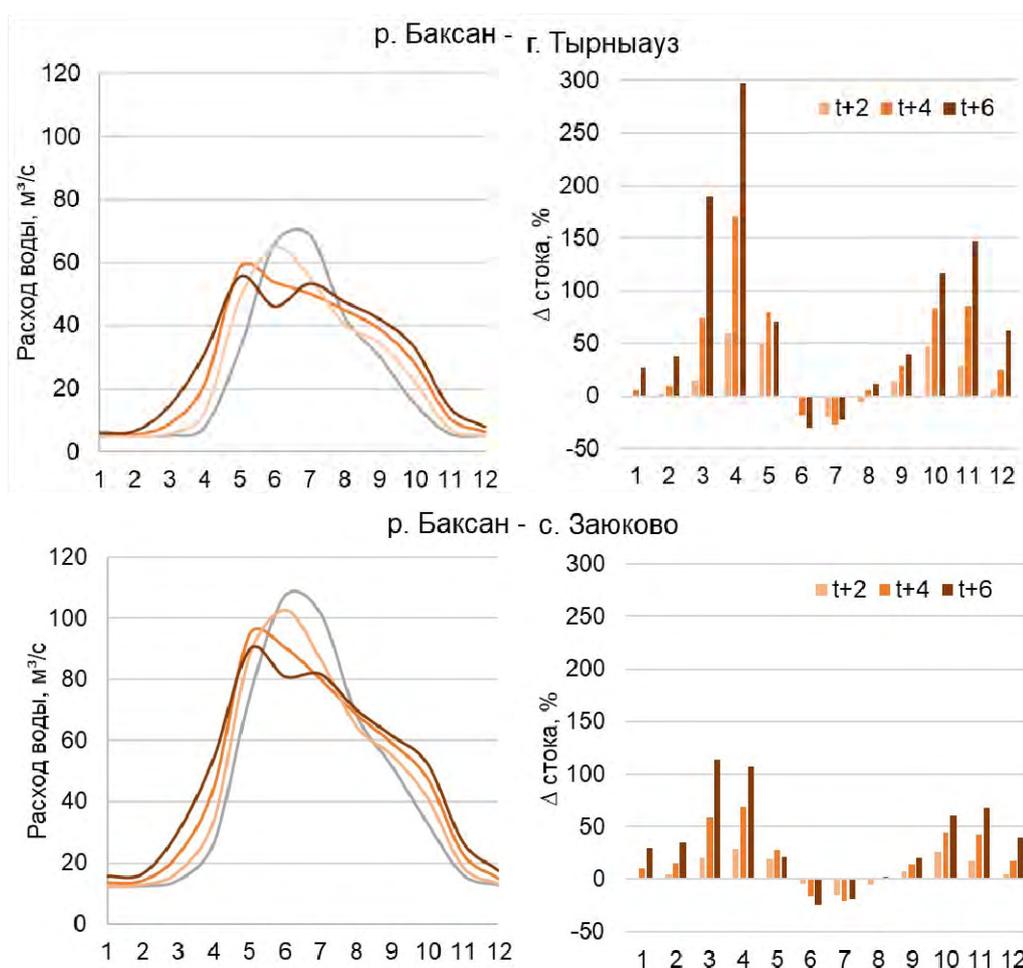


Рисунок 4.3 – Осредненные за период с 2010 по 2020 гг. среднемесячные гидрографы по результатам численного эксперимента при изменениях температуры воздуха (слева) и их аномалии по сравнению с базовым сценарием (*temp*) (справа)

В результате увеличения температуры воздуха происходит сдвиг половодья на более ранние сроки, снижение летних расходов воды, и, наоборот, увеличение осеннего стока (рис. 4.3). Изменение расходов воды при реализации сценария $\text{temp}+6^{\circ}\text{C}$ в весенние месяцы в створе г. Тырныауз может достигнуть 200–300%, в то время как в створе с. Заюково изменения при тех же условиях немного превышают 100%. Сток в летние месяцы снизится, что обусловлено увеличением испарения и сдвигом снеготаяния в части высотных зон на более ранние сроки. В осенний период в результате увеличения температуры воздуха, которое вызовет увеличение таяния вечных снегов, а также увеличит количество жидких осадков, ожидается повышение стока до 150% в створе г. Тырныауз и до 60% в створе с. Заюково при сценарии $\text{temp}+6^{\circ}\text{C}$.

4.5. *Обобщение*

По результатам данной главы проведены численные эксперименты по оценке чувствительности характеристик водного режима к различным входным условиям (оледенение, количество осадков и температура).

Численный эксперимент по оценке чувствительности к изменению площади оледенения показал, что, во-первых, изменение площади оледенения в большей мере влияет на сток в высокогорной части бассейна, при движении вниз по течению влияние ослабевает – при отдалении от очагов оледенения снижается ледниковый сток. 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.

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

Результаты численных экспериментов по оценке чувствительности характеристик водного режима к изменению температуры воздуха показали, что 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 моделей³

5.1. Разработка схемы усвоения моделью ECOMAG данных из климатической и гляциологической модели

Для оценки изменений водных ресурсов в бассейне р. Терек до конца XXI в. при расчетах по модели формирования стока ECOMAG использовались данные мезомасштабного климатического моделирования проекта CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) [<https://cordex.org>] и результаты оценки отступления ледников по данным гляциологической модели GloGEMFlow-debris [Zekollari et al., 2019, Postnikova et al., 2023]. Сложный модельный эксперимент, основанный на сочетании гляциологической, климатических и гидрологической модели, был спланирован и реализовывался в течение двух лет в ходе выполнения междисциплинарного проекта РФФИ 21-55-10003 «Моделирование эволюции оледенения Кавказа в будущем и ее последствий для водных ресурсов и возникновения опасных явлений» при активном участии автора диссертации. Для оценки изменений стока высокогорной части бассейна реки Терек при расчетах на основе комплекса моделей были рассмотрены два сценария эмиссии парниковых газов (RCP): RCP 2.6 («мягкий») и RCP 8.5 («жесткий») [Taylor et al., 2011].

5.1.1. Усвоение данных климатического моделирования

Особенность подхода, реализованная в проекте CORDEX, 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). На этой основе задаются граничные условия региональным (мезомасштабным) климатическим моделям, которые работают уже на гораздо более детальном пространственном разрешении (11–50 км).

Предварительная обработка данных CORDEX для исследуемого региона была проведена И.А. Корневой (Институт географии РАН) в рамках выполнения указанного выше проекта РФФИ. Для всех полей была проведена коррекция и регионализация исходных данных моделирования CORDEX с помощью станционных метеорологических данных по 22 метеорологическим станциям для Центрального Кавказа и соседних

³ Раздел написан на основе статьи [Корнилова и др., 2023]

территорий, включающих бассейн реки Терек, а также отдельно для района Эльбруса [Корнева, Рыбак, 2020]. 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, 2020].

Исторический период данных CORDEX включает суточные данные об осадках и температуре воздуха за 1977–2005 гг., прогностический – аналогичные данные за 2006–2099 гг., итоговое пространственное разрешение данных о температуре и осадках после регионализации – 1*1 км (рис. 5.1), временной шаг – 1 сутки.

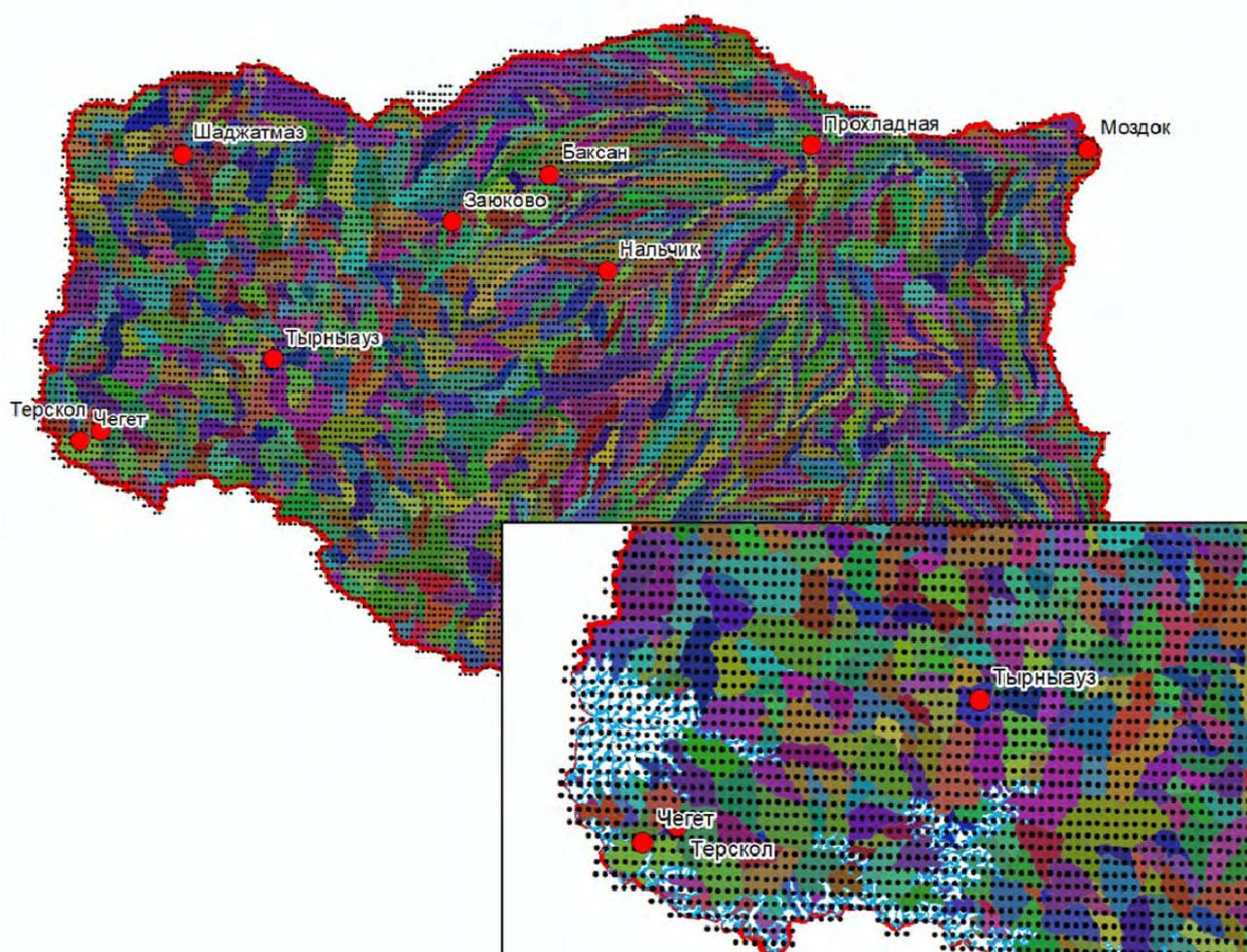


Рисунок 5.1 – Элементарные водосборы в бассейне р. Терек и регулярная сетка метеорологических данных CORDEX

Для ввода в модель формирования стока ECOMAG суточные данные CORDEX с помощью специально написанных скриптов на языке Фортран были преобразованы в необходимый для модели формирования стока формат *.bas.

Поскольку данные CORDEX по влажности воздуха доступны только с пространственным разрешением 25*25 км, что несопоставимо с пространственным шагом данных о температуре и осадках и недостаточно для оценки испарения в рассматриваемых бассейнах, для расчетов по данным CORDEX использовалась версия модели ECOMAG, в которой для расчета испарения используются только данные о температуре воздуха и осадках [Мотовилов и др., 2022].

Для перехода от моделирования по данным метеостанций к данным климатической модели была выполнена дополнительная калибровка ряда параметров модели ECOMAG, связанных с критической температурой таяния, критической температурой выпадения осадков и испарением. Калибровка параметров модели формирования стока проводилась по данным CORDEX за период 1995–2005, валидация – за весь исторический период 1977–2005 (таблица 5.1, рис. 5.2).

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 R^2 позволяют оценить лишь общее сходство гидрографов за среднесуточный период. По результатам валидации модель ECOMAG удовлетворительно воспроизводит как гидрографы, так и годовые объемы стока при расчетах по данным климатического моделирования.

Таблица 5.1 – Результаты оценки критериев качества моделирования при расчетах 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	0.65	0.77	-13.0
р. Баксан – с. Заюково	0.51	0.72	7.8
р. Чегем – с. Нижний Чегем	0.31	0.50	10.9
р. Малка – с. Каменноостское	0.48	0.74	-2.5
Р. Терек – ст. Котляревская	0.42	0.76	9.0

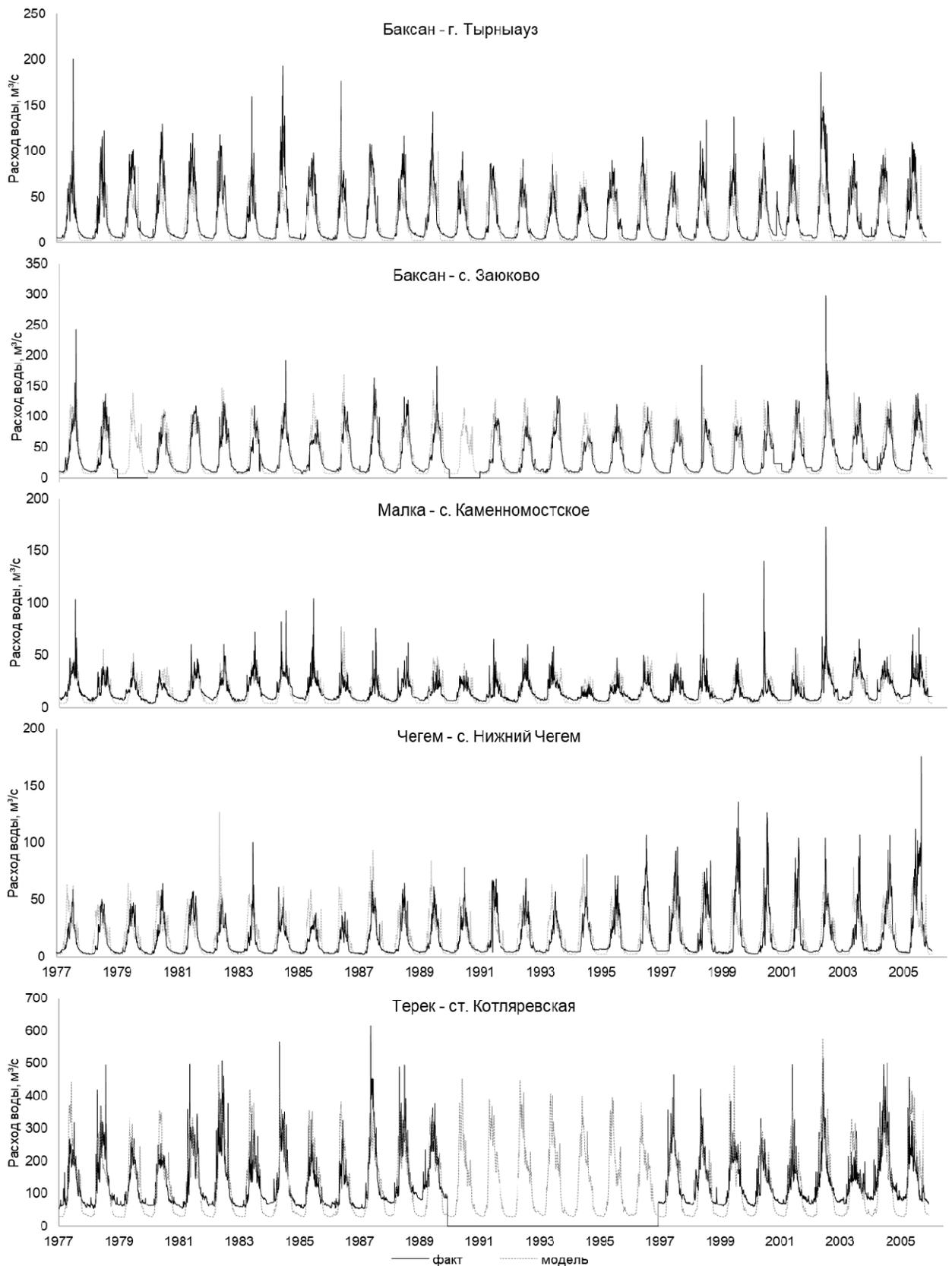


Рисунок 5.2 – Фактические и смоделированные суточные гидрографы р. Терек по данным климатического моделирования проекта CORDEX за исторический период 1977–2005 гг.

5.1.2. Усвоение данных гляциологической модели

Данные об изменении площади оледенения в пределах водосбора и оценки их возможных изменений в XXI в. были получены на основе модифицированной версии модели GloGEMFlow [Zekollari et al., 2019], получившей название GloGEMflow-debris благодаря включению блока для расчета моренного покрова [Postnikova et al., 2023]. В модели используется уравнение неразрывности для моделирования движения и эволюции ледника вдоль осевой линии, существенными компонентами для учета эволюции моренного покрова в модели являются: поступление моренного материала на ледник, динамическое перераспределение (перенос) моренного покрова, вытаивание в зоне абляции и вынос в прифронтальную зону.

Данные гляциологического моделирования были предоставлены Постниковой (Дымовой) Т.Н. [Постникова, Рыбак, 2021; Постникова, Рыбак, 2022; Postnikova et al., 2023] в рамках выполнения вышеуказанного проекта РФФИ № 21-55-10003 и представляли собой оценки возможного изменения площади всех ледников, упомянутых в каталоге RGI-6, на территории исследуемого бассейна в 21 веке, а также оценки возможных изменений площади и толщины моренного чехла.

Входные данные в ледниковый блок модели формирования стока ECOMAG вводятся как процент оледенения каждого элементарного водосбора (рис. 5.3). При этом один ледник может находиться в нескольких элементарных водосборах, или в пределах одного элементарного водосбора могут находиться несколько ледников. В связи с этим была разработана система пересчета и схема усвоения данных гляциологического моделирования, в результате были получены площади оледенения внутри каждого элементарного водосбора с временным разрешением 10 лет, сформированы необходимые для работы ледникового блока управляющие файлы в формате модели ECOMAG, которые далее использовались при моделировании. Обновление площади ледников один раз в 10-летний период обусловлено тем, что согласно сопоставлению результатов моделирования с данными по абляции по опорным ледникам, ECOMAG корректно имитирует таяние за выбранный период без замены маски оледенения. Стоит отметить, что в природе ледник тоже не исчезает мгновенно – он покрывается мореной, превращается в мертвый лед, который продолжает таять.

Также по данным гляциологического моделирования был учтен 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} :

$$k_{debris} = \exp \frac{-h_{debris}}{1.15}$$

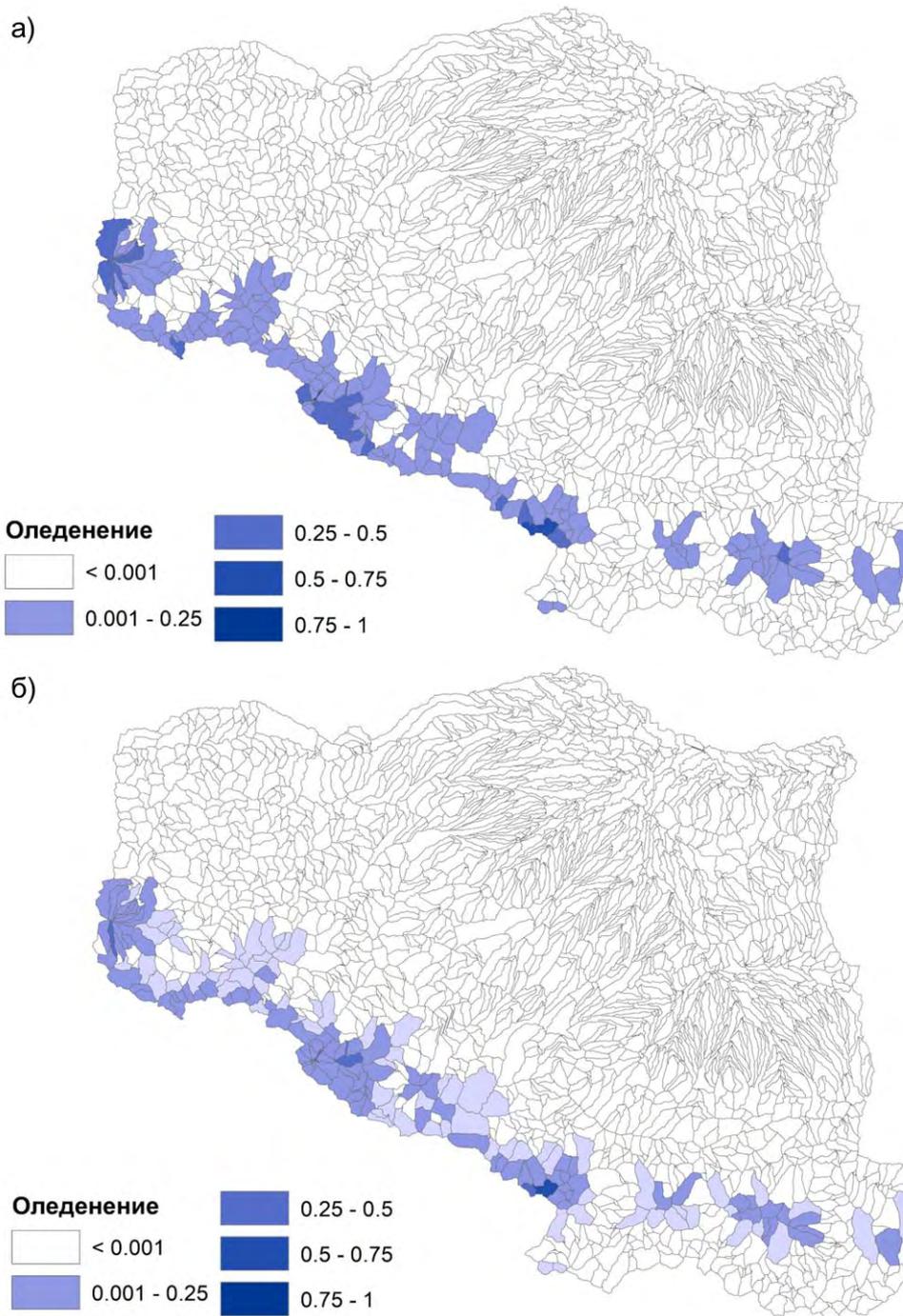


Рисунок 5.3 – Доля оледенения внутри элементарных водосборов при сценарии RCP2.6 (сверху) и RCP8.5 (снизу) по состоянию на 2090 г.

Для учета влияния моренного чехла на таяние полученный коэффициент редукции таяния k_{debris} домножался на коэффициент таяния чистого льда и на покрытость мореной ледника (%). Затем вычислялся средневзвешенный коэффициент таяния (между замороженным и чистым льдом) и вводился в модель формирования стока каждые 10 лет (рис. 5.4). Таким образом, учитывалось не только уменьшение площади оледенения, но и эффект уменьшения таяния за счет увеличения моренного чехла. Следует отметить, что усиление таяния, которое может происходить при очень тонком покрытии моренными

отложениями, не реализуется в данном варианте расчетов по гляциологической модели, но как уже упоминалось выше, в целом на Кавказе преобладают ледники с толстым моренным чехлом. Как показывают наблюдения на репрезентативном леднике Джанкуат, участки с толщиной моренного чехла от 0.02 до 0.07 м, где может происходить усиление таяния, имеют крайне незначительную площадь [Bozhinskiy, Krass, Popovnin, 1986; Popovnin, Rozova, 2002; Lambrecht et al., 2011], и их недоучет не окажет существенного влияния на результаты моделирования.

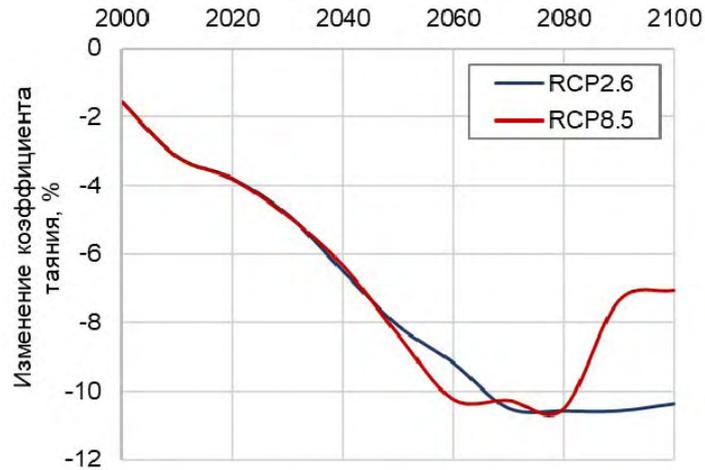


Рисунок 5.4 – Изменение средневзвешенного коэффициента таяния при реализации сценариев RCP2.6 и RCP8.5 с учетом коэффициента редукции таяния моренного чехла и изменения его площади по данным гляциологического моделирования



Рисунок 5.5 – Схема усвоения данных климатического и гляциологического моделирования моделью формирования стока ECOMAG [Корнилова и др., 2023]

Итоговая блок-схема усвоения данных климатического и гляциологического моделирования при расчетах по модели формирования стока ECOMAG представлена на

рис. 5.5. Все сценарные расчеты по модели ECOMAG проводились с суточным шагом, а далее результаты осреднялись по периодам для расчета аномалий исследуемых характеристик.

5.2. Возможные изменения факторов формирования стока в бассейне р. Терек в XXI в. при различных климатических сценариях

Были проанализированы аномалии гидрометеорологических характеристик, включая температуру воздуха, осадки, испарение, снеготаяние, осредненных по всему бассейну за прогностические периоды 2006–2039, 2040–2069, 2070–2099 гг., относительно аналогичных, смоделированных за базовый исторический период 1977–2005 гг.

5.2.1. Приземная температура воздуха

По данным климатического моделирования CORDEX ожидается, что по сравнению с историческим периодом, при сценарии RCP8.5 среднегодовые температуры воздуха на территории бассейна р. Терек повысятся на 2°C к середине XXI в. (2040–2069 гг.) и на 4°C к концу XXI в. (2070–2099 гг.). В соответствии с «мягким» сценарием (RCP2.6) средняя температура может повыситься на 0.8–1.2°C в течение 2040–2069 гг. и на 1–1.2°C в течение 2070–2099 гг. (рис. 5.6а). Также стоит отметить, что в «мягком» сценарии ко второй половине XXI в. климатический фон в регионе стабилизируется, в отличие от «жесткого» сценария.

При анализе внутригодового хода осредненной по бассейну р. Терек температуры воздуха было выявлено, что в летние месяцы 2070–2099 гг. увеличение температуры по сравнению с историческим периодом 1977–2006 гг. достигнет 2–3°C и 6–7°C, согласно сценариям RCP2.6 и RCP8.5 соответственно (рис. 5.8а). При этом аномалии температуры воздуха в зимние месяцы меньше, в том числе отрицательные. 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 последнее тридцатилетие столетия аномалии температуры воздуха за зимние месяцы будут положительными и составят 1–2°C.

5.2.2. Осадки

В обоих сценариях ожидается увеличение годовой суммы осадков до середины XXI в. – 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 (рис. 5.6б). В сценарии RCP2.6 ожидаются положительные аномалии годовой суммы осадков до конца XXI в.

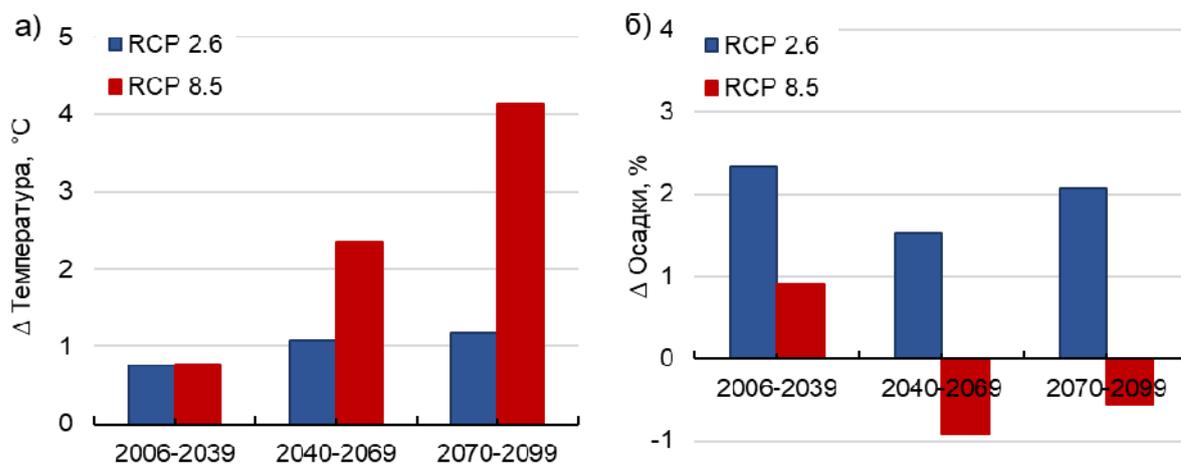


Рисунок 5.6 – Прогнозируемое изменение температуры воздуха (а) и годовой суммы осадков (б) на территории Центрального Кавказа для двух различных сценариев (RCP2.6 и RCP8.5) и временных периодов (2006–2039, 2040–2069 и 2070–2099) относительно исторического периода 1977–2005 гг.

Однако, при рассмотрении пространственного распределения поля осадков можно заметить, что аномалии осадков в разных частях бассейна значительно отличаются от средних (рис. 5.7). В сценарии RCP2.6 на большей части исследуемого бассейна прогнозируется увеличение осадков до 10–20%, при реализации сценария RCP8.5 ожидается, главным образом, уменьшение осадков до 10–20% в высокогорной и равнинной и, наоборот, увеличение до 20% в предгорной части водосбора. Стоит отметить, что по обоим климатическим сценариям ожидается увеличение количества осадков на 10–20% на предгорных территориях, особенно в долинах рек Баксан и Малка.

Внутригодовое распределение осадков более чувствительно к климатическим изменениям, так, ожидается увеличение количества осадков зимой с октября по март и, наоборот, значительное уменьшение в остальной период. Наибольший рост осадков возможен в декабре – в период 2070-2099 гг. он составит 15% и 23% в сценариях RCP2.6 и RCP8.5, соответственно, что способствует аккумуляции снега. В январе и феврале увеличение количества осадков составит 5-10% для обоих сценариев (рис 5.8б). В летние месяцы ожидается снижение количества осадков, особенно при «жестком» сценарии в 2070-2099 гг. и составит от 8% в июне до 25% в августе.

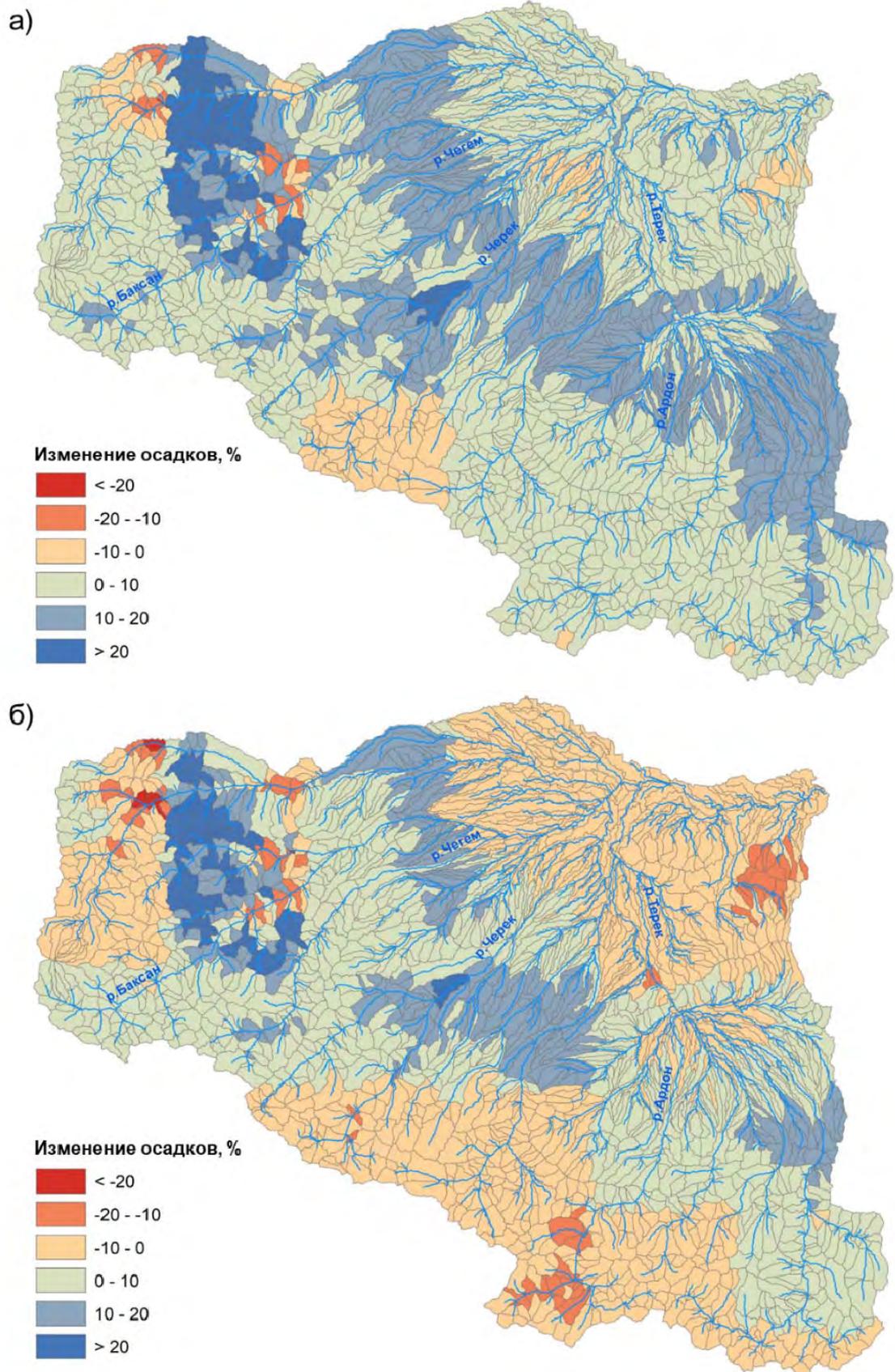


Рисунок 5.7 – Аномалии осадков (%) при климатических сценариях RCP 2.6 (а) и RCP 8.5 (б) за период 2070–2099 гг. относительно базового исторического периода для элементарных водосборов в высокогорной части бассейна р. Терек

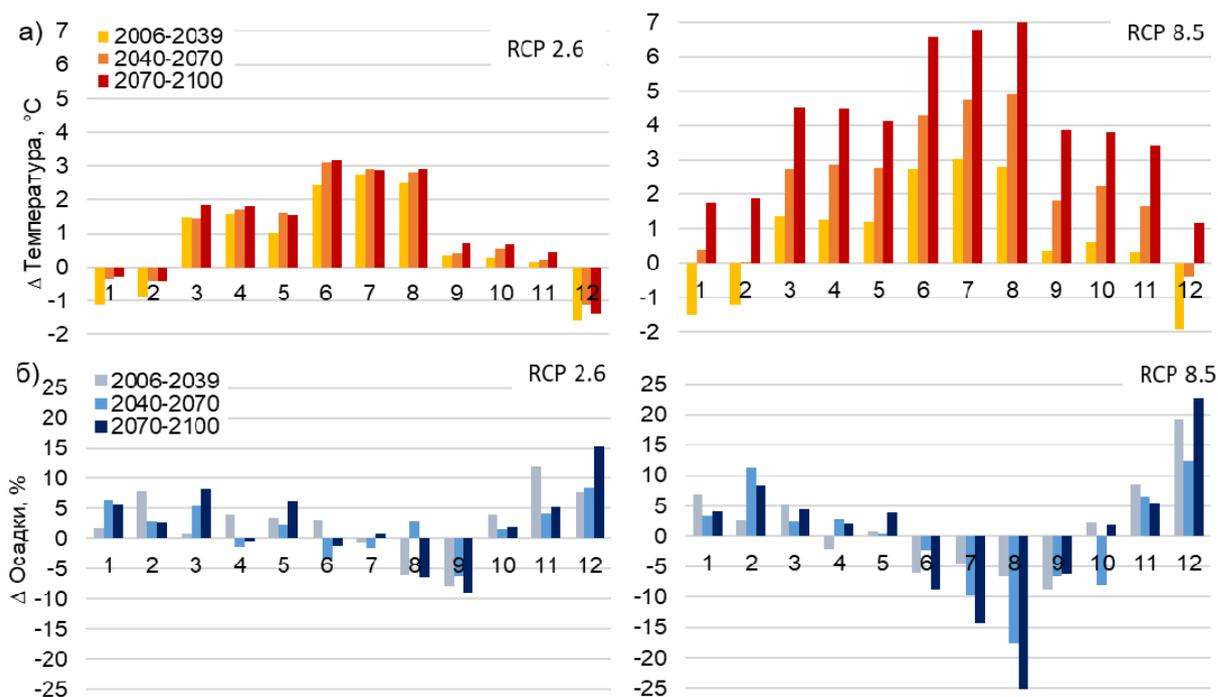


Рисунок 5.8 – Прогнозируемый годовой ход аномалий приземной температуры воздуха (а) и осадков (б) в пределах исследуемого бассейна р. Терек согласно сценариям RCP2.6 и RCP8.5

Ожидается увеличение количества твердых осадков, выпадающих на поверхность снега, в зимние месяцы с декабря по февраль и, наоборот, значительное уменьшение в остальной период, в большей мере с мая по октябрь, при обоих климатических сценариях (рис. 5.9б). То есть аккумуляция снега будет активизироваться из-за отрицательных тенденций температуры в зимний период, однако, это не будет компенсировать повышение температуры летом, которое вызовет уменьшение осадков, выпадающих на поверхность снега, в остальной период года и увеличит таяние. Увеличение жидких осадков, выпадающих на поверхность снега (рис. 5.9в), в весенние и осенние месяцы связано с увеличением периода положительных температур. Стоит отметить, что при реализации «жесткого» сценария жидкие осадки, выпадающие на поверхность снега, будут наблюдаться и в зимние месяцы в последней трети XXI в. [Корнилова и др., 2023].

Внутригодовое распределение количества осадков, выпадающих на поверхность почвы, имеет обратную картину – максимум достигается в летний период и минимум зимой (рис. 5.9а). На период прогноза в зимние месяцы ожидается уменьшение осадков на поверхность почвы в связи с тем, что зимой ожидается понижение температур и увеличение твердых осадков и, соответственно, увеличение площади, покрытой снежным покровом. Вслед за положительными аномалиями температур воздуха в марте,

повышаются и аномалии осадков на поверхность почвы. Стоит отметить, что наибольшие изменения наблюдаются в марте, что соответствует изменениям снеготаяния. Однако увеличение осадков наблюдается и в осенний период, что может привести к возникновению выраженных осенних паводков.

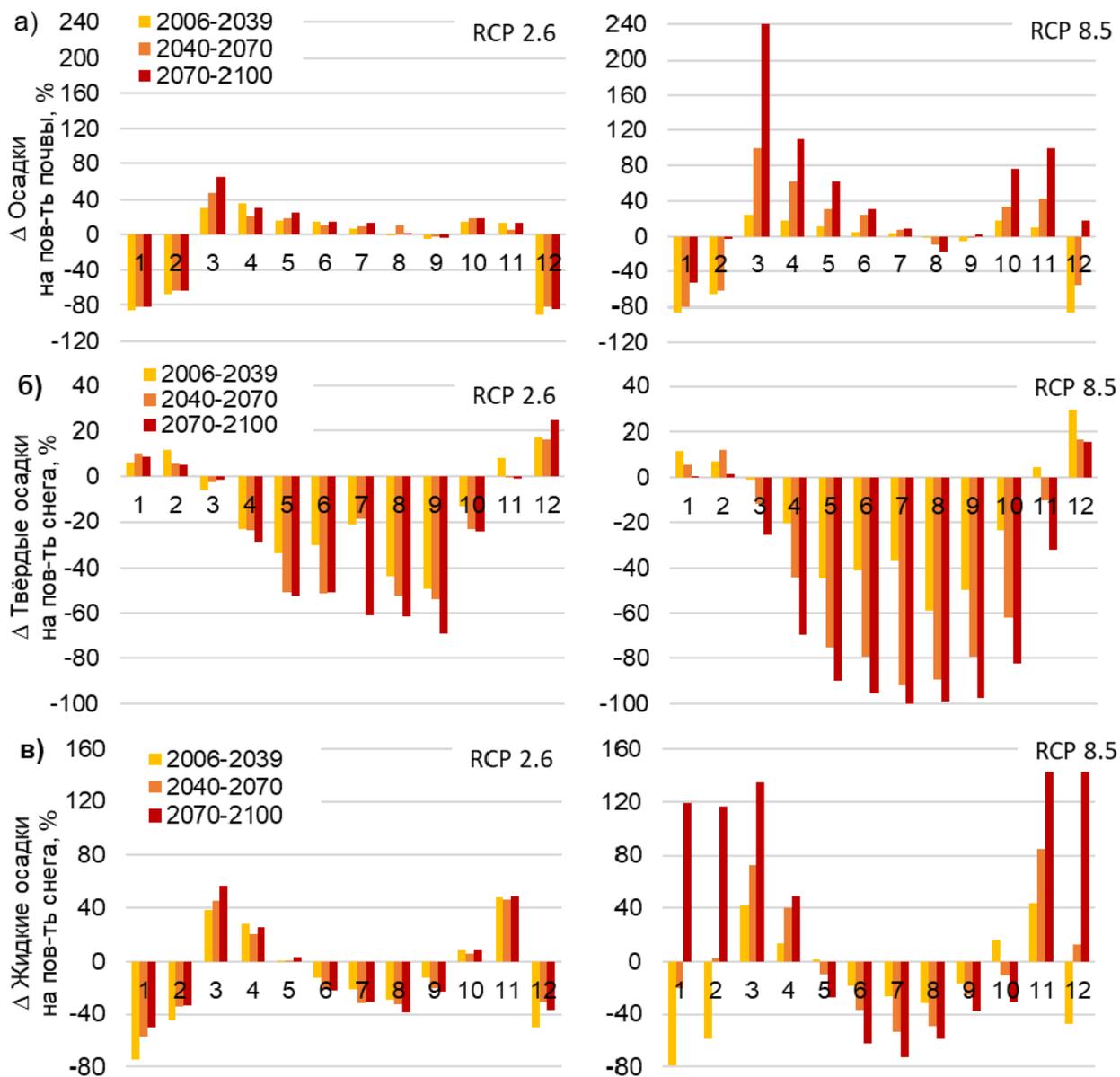


Рисунок 5.9 – Прогнозируемое изменение аномалий внутригодового распределения жидких (а) и твердых (б) осадков на территории исследуемого бассейна р. Терек для двух различных сценариев (RCP2.6 и RCP8.5) в пределах исследуемого водосбора

5.2.3. Испарение

Вслед за ростом температуры возрастает испарение с поверхности исследуемого бассейна р. Терек (рис. 5.10). По реализации сценария RCP2.6 испарение к последней трети XXI в. возрастет на 8%, при это в сценарии RCP8.5 – более чем на 25%.

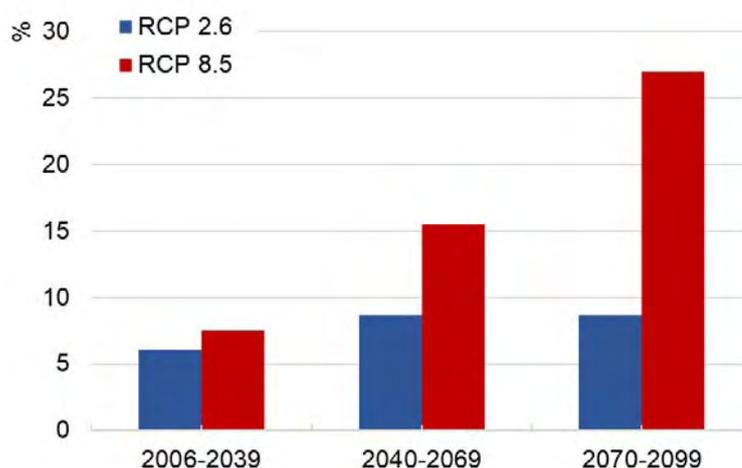


Рисунок 5.10 – Прогнозируемое изменение испарения на территории исследуемого бассейна р. Терек для двух различных сценариев (RCP2.6 и RCP8.5) и временных периодов (2006–2039, 2040–2069 и 2070–2099) относительно исторического периода 1977–2005 гг.

Изменение испарения по месяцам также влияет на внутригодовое распределение стока. Согласно расчетам, ожидается значительное увеличение испарения в сценарии RCP8.5 в летний период (рис. 5.11). Например, в створе г. Тырнауз – р. Баксан ожидается увеличение испарения в июне на последнюю треть XXI в. почти на 80 мм. Однако во второй половине лета увеличение испарения начинает снижаться, что влияет на увеличение стока в осенний период.

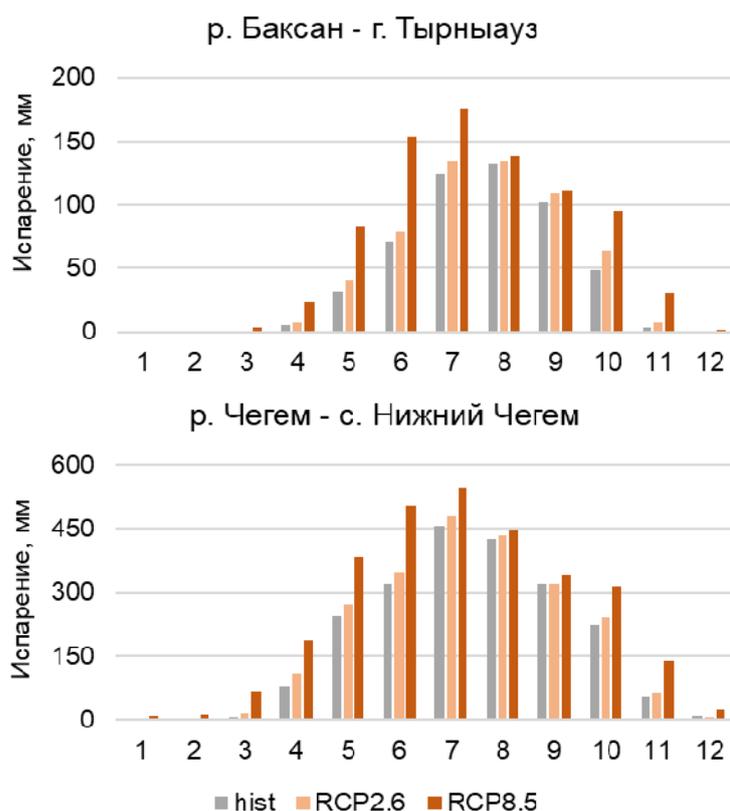


Рисунок 5.11 – Изменение испарения по состоянию на исторический период 1977–2005 гг. и период 2070–2099 гг. для различных замыкающих створов при реализации сценариев RCP2.6 и RCP8.5

5.2.4. Снеготаяние

Изменения снеготаяния, полученные по результатам моделирования на основе модели ECOMAG, в целом, хорошо соотносятся с изменениями температуры воздуха (рис. 5.12). На фоне отрицательных аномалий температур воздуха ожидается уменьшение снеготаяния в период с декабря по февраль, и увеличение – в весенний и осенний период из-за их положительных аномалий. В летние месяцы (с июня по август), напротив, прогнозируется уменьшение снеготаяния относительно исторического периода, что обусловлено таянием основной массы снега в весенний период. За счет увеличения температуры воздуха в более ранние сроки большая часть накопившегося за зиму снежного покрова успеет растаять до наступления лета, что, как будет рассмотрено ниже, приведет к перестройке гидрографов. Стоит отметить, что при реализации «жесткого» сценария возможно значительное увеличение снеготаяния, особенно в конце XXI в., что сильно повлияет на внутригодовой ход стока. В период 2070-2090 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.

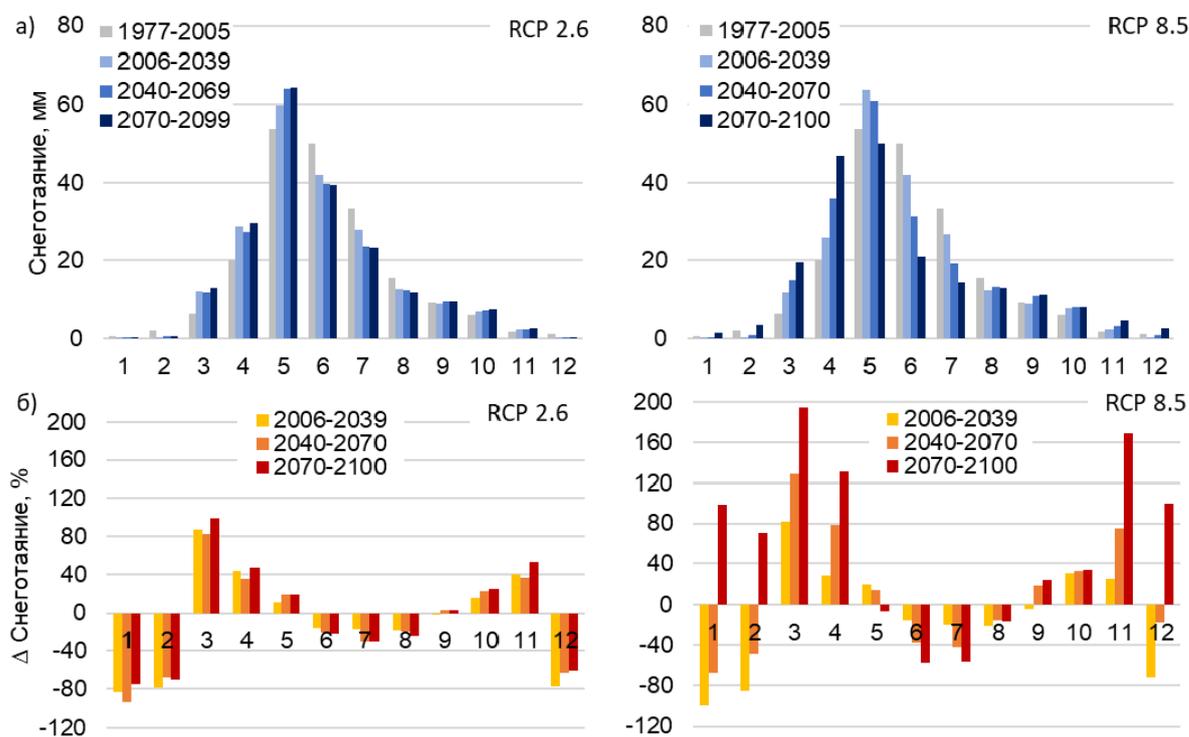


Рисунок 5.12 – Прогнозируемый годовой ход снеготаяния (а) и его аномалии (б) в пределах исследуемого бассейна р. Терек согласно сценариям RCP2.6 И RCP8.5

Также под воздействием рассмотренных выше изменений метеорологических условий изменяется среднемноголетнее положение снеговой линии в высокогорной части бассейна (рис. 5.13). Для сопоставления положения снеговой линии были взяты данные о

снежном покрове по элементарным водосборам по состоянию на 1 сентября осредненные по периодам (исторический период 1977–2005 гг., 2006–2099 гг. по двум климатическим сценариям). Видно, что в последнее тридцатилетие XXI в. снежный покров в конце вегетационного периода сохраняется на меньшем количестве элементарных водосборов. Так, согласно результатам моделирования на основе исторических данных по состоянию на 1 сентября в среднем за период покрыто снегом 222 водосбора, то на последнюю треть XXI в. – 89 и 50 водосборов в сценарии RCP2.6 и RCP8.5, соответственно. При этом средняя высота покрытых снегом водосборов увеличивается и составляет 3356 м при расчете по историческим данным, в сценарии RCP2.6 – 3598 м, в сценарии RCP8.5 – 3757 м. Увеличение высоты расположения среднемноголетней снеговой линии также свидетельствует о том, что рост температуры воздуха не компенсируется повышением зимних осадков.

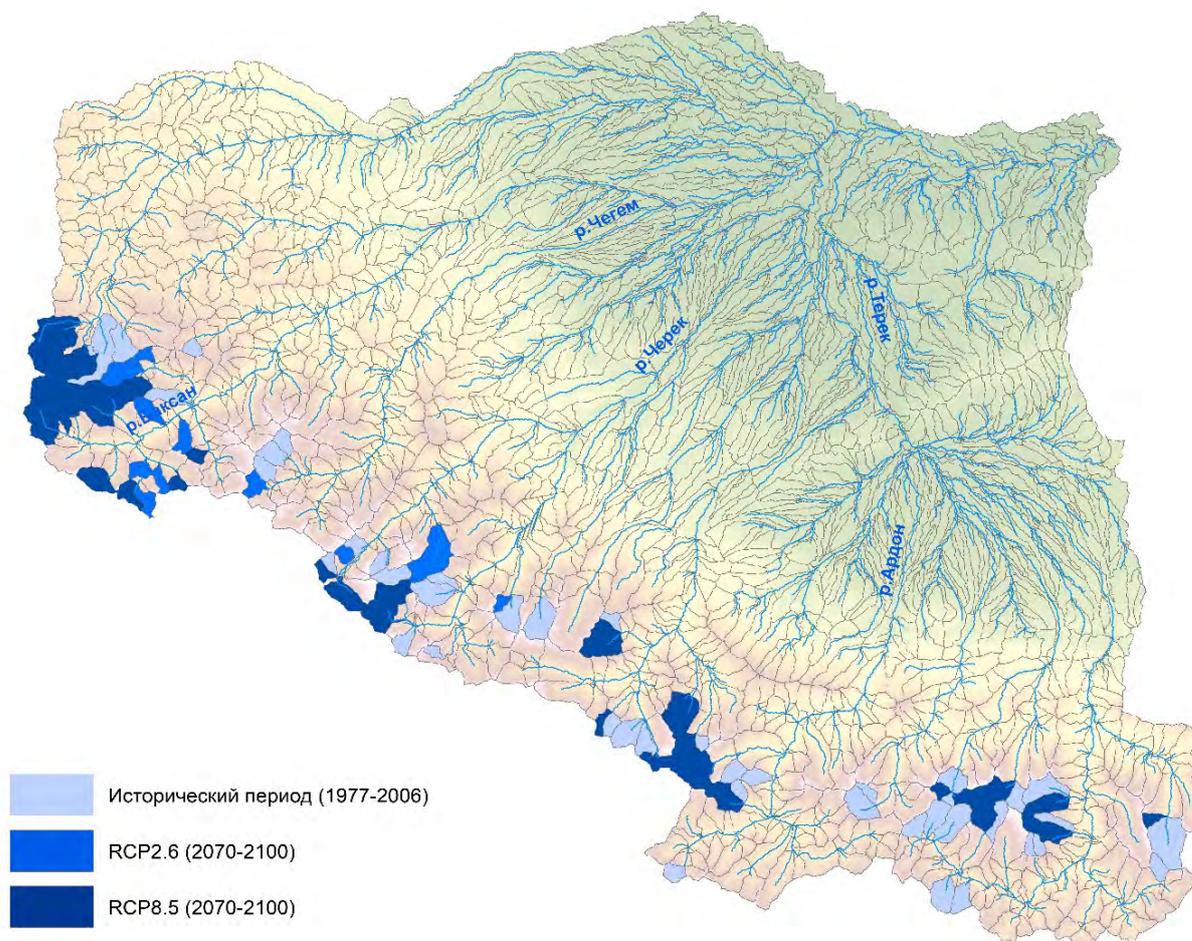


Рисунок 5.13 – Элементарные водосборы, в пределах которых присутствует снежный покров по состоянию на 1 сентября по результатам моделирования для исторического периода и при реализации климатических сценариев RCP2.6 и RCP8.5 в конце XXI в.

5.2.5. Оледенение

Согласно результатам гляциологического моделирования [Postnikova et al., 2023], до 2040 г. площадь оледенения будет снижаться с одинаковой интенсивностью по сценариям RCP2.6 и RCP8.5, и уменьшится на 30% по сравнению с оледенением 1990 г. (рис. 5.14). В соответствии со сценарием RCP2.6 площадь оледенения к 2080 г. уменьшится на 55% и стабилизируется до конца 21 века. Однако по «жесткому» сценарию RCP8.5 площадь оледенения будет снижаться вплоть до конца столетия и уменьшится суммарно на 90% [Корнилова и др., 2023].

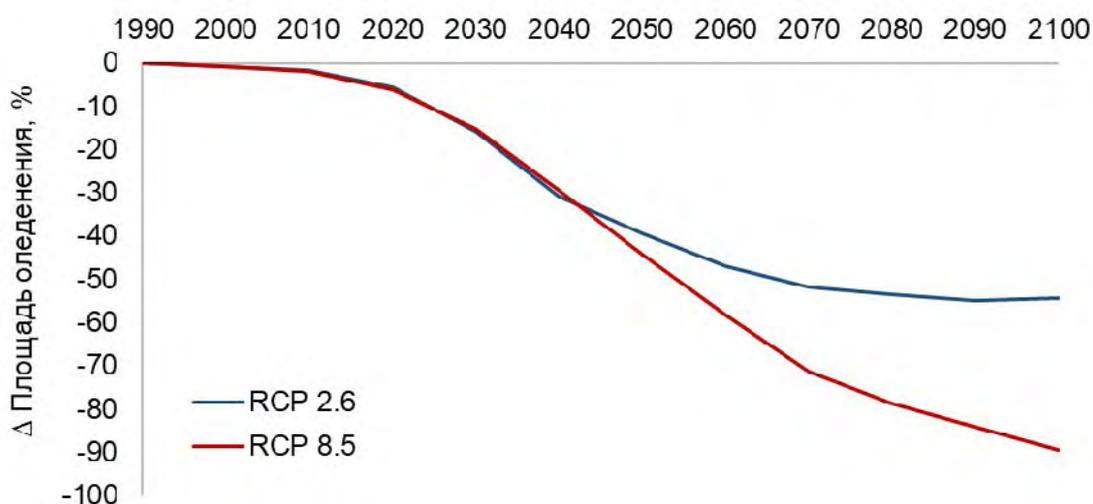


Рисунок 5.14 – Прогнозируемое изменение площади оледенения (%) на территории исследуемого бассейна р. Терек для двух различных сценариев (RCP 2.5 и RCP 8.5) относительно площади оледенения в 1990 г.

Однако ледники в пределах исследуемого бассейна имеют различные морфологическое строение, высотное расположение и массу, поэтому и их трансформация в условиях меняющегося климата будет различной. В связи с этим необходимо отдельно проанализировать динамику ледников, расположенных в пределах конкретных водосборов, где берут начало притоки р. Терек (рис. 5.15). Например, в пределах водосбора р. Малка, которая питается преимущественно стоком с ледников, расположенных на г. Эльбрус, площадь оледенения по сценарию RCP8.5 может сократиться к концу столетия на 75%. В то время как в пределах водосбора р. Чегем, где ледники принадлежат Большому Кавказскому хребту, площадь оледенения снизится практически на 100% вплоть до полного исчезновения. Соответственно, изменение площади оледенения будет отличаться для конкретных водосборов.

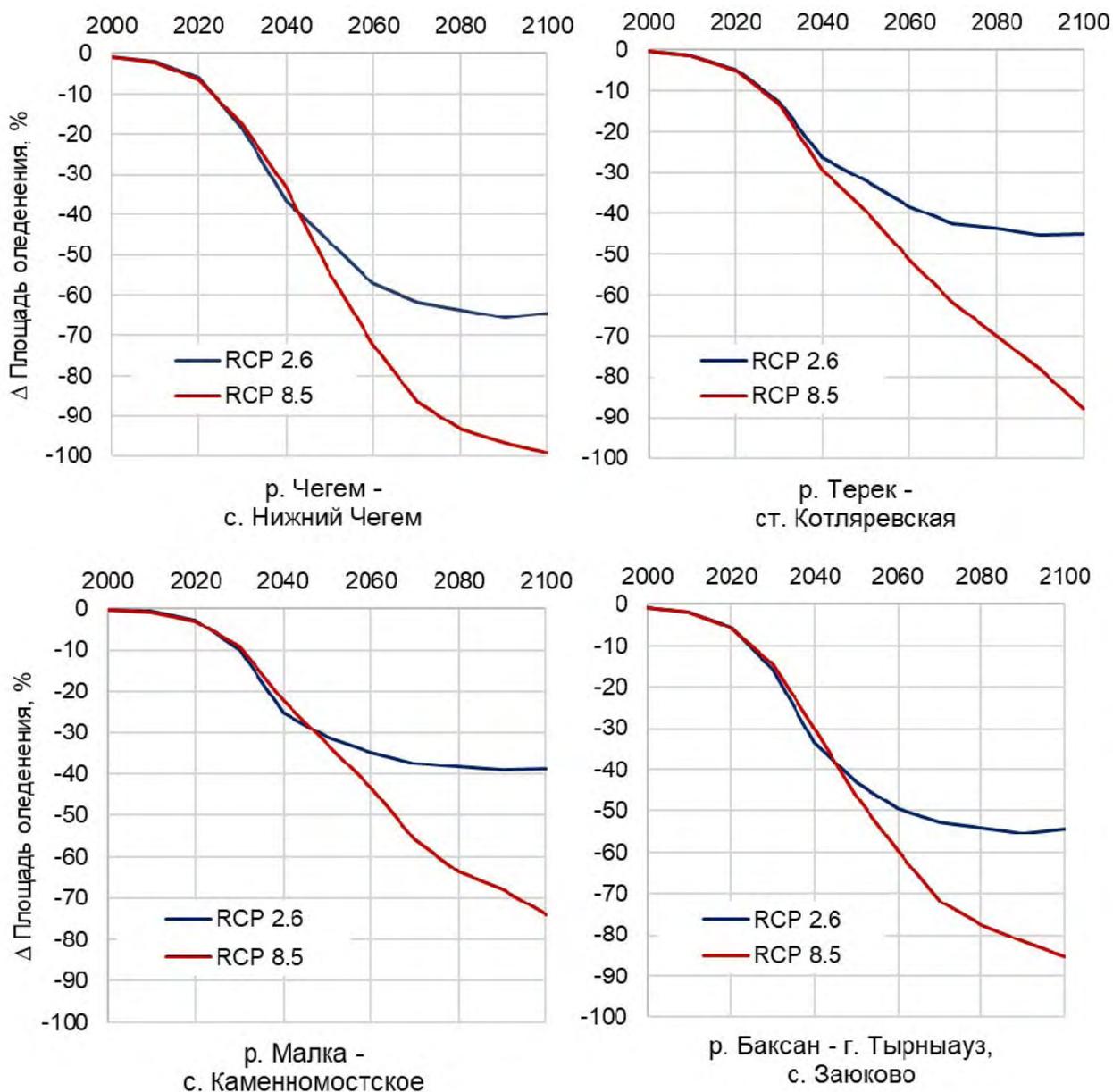


Рисунок 5.15 – Прогнозируемое изменение площади оледенения (%) на территории исследуемого бассейна р. Терек для двух различных сценариев (RCP 2.5 и RCP 8.5) для бассейнов рек до различных замыкающих створов на территории исследуемого бассейна р. Терек

5.3. *Результаты моделирования изменений объемов годового стока с учетом изменения климата и оледенения в XXI в.*

По результатам моделирования процессов формирования стока с учетом изменения климата и оледенения в XXI в. выявлено, что при сочетании указанных факторов возможно как снижение, так и увеличение стока в высокогорной зоне в зависимости от степени и темпов деградации оледенения, расположения зоны снегового и ледникового питания (рис. 5.16) [Корнилова и др., 2023].

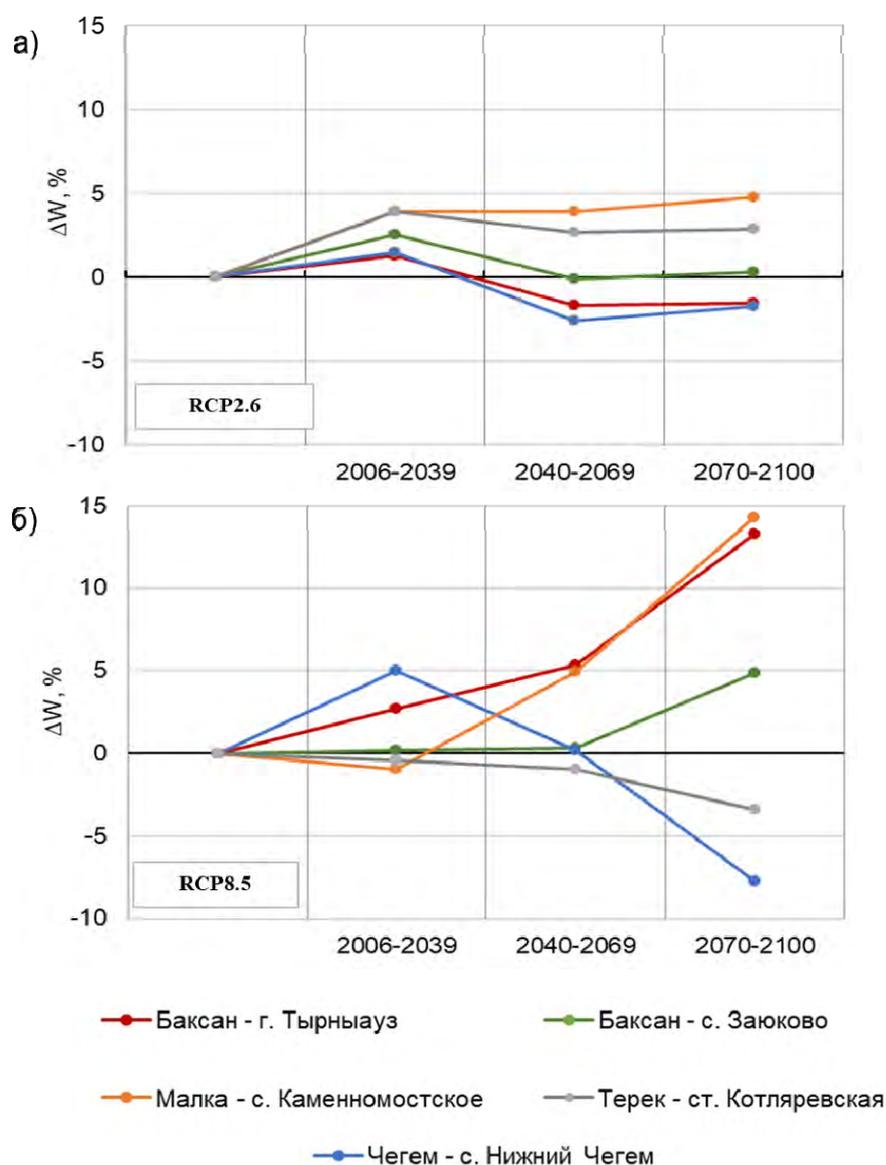


Рисунок 5.16 – Аномалии стока (%) при климатических сценариях RCP 2.5 (а) и RCP 8.5 (б) относительно базового исторического периода для различных створов в высокогорной части бассейна р. Терек

В сценарии RCP2.6 изменения стока не столь значительны, как в сценарии RCP8.5. Во всех створах ожидается увеличение объема стока в период 2006–2039 гг. на 1–4%, затем снижение в период 2040–2069 гг. и его стабилизация в последней трети XXI в., что коррелирует со стабилизацией температуры и площади оледенения. В 2070–2099 гг. продолжит незначительно расти сток в створах р. Малки – гп Каменноостское и р. Терек – гп Котляревская, которые в том числе питаются за счет таяния ледников и вечных снегов Эльбруса и Казбека. В створе р. Баксан – гп Заюково, в отличие от расположенного выше по течению створа гп Тырнауз, сток незначительно увеличится, что обусловлено большей долей дождевого питания. При сценарии RCP2.6 к последней трети XXI в. ожидаются незначительные изменения слоев годового снегового и дождевого

стока (до 70–80 мм) (рис. 5.17а, б). Однако на фоне повышения температуры и деградации оледенения, ожидается снижение годового ледникового стока на 150–400 мм (рис. 5.17в). Поэтому наибольшее влияние будет оказывать деградация оледенения, что обуславливает снижение стока в высокогорных частях бассейнов р. Баксан (г. Тырнауз) и р. Чегем (с. Нижний Чегем). Однако фоновое увеличение количества осадков будет сказываться на увеличении стока более крупных бассейнов, имеющих большую долю дождевого питания [Корнилова и др., 2023].

В сценарии RCP8.5 в бассейнах р. Баксан и р. Малка (г. Тырнауз – р. Баксан, с. Заюково – р. Баксан, ст. Каменноостское – р. Малка), в которых значительная часть ледникового и снегового стока поступает со склонов Эльбруса, изменения объема стока значительно больше, чем в сценарии RCP2.6. Изменения имеют положительную направленность, что связано с увеличением водоотдачи из снежного покрова в последней трети XXI в. В связи с этим в данных бассейнах увеличится слой снегового стока на 100–400 мм, в остальных исследуемых створах снеговой сток уменьшается в условиях меняющегося климата (рис. 5.17а). Наибольшее увеличение стока в сценарии RCP8.5 к концу XXI в. ожидается в створах р. Малка – на гп Каменноостское (14%) и р. Баксан – на гп Тырнауз (13%). Изменение объема 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 гп Заюково, в сценарии RCP8.5 составит 5%. В створе р. Терек на гп Котляревская, замыкающем осетинскую часть бассейна р. Терек, возможно незначительное снижение объема стока в течение всего прогнозного периода, которое к концу века не превысит 4%. При сценарии RCP8.5 ожидается значительное увеличение вклада дождевого стока (на 120–420 мм), снижение ледникового стока на 50–450 мм (рис. 5.17б, в).

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 объем стока р. Чегем будет расти до середины века на величину до 5%, а далее начинает значительно снижаться, а в последней трети XXI в. снизится на 8%. Увеличение объема стока рек Малки и Баксана будет продолжаться вплоть до конца столетия, однако, главным образом, связано с увеличением таяния вечных снегов, расположенных в пределах Эльбруса, при этом вклад ледникового стока будет уменьшаться. Стоит отметить, что подобный эффект ожидается и в высокогорных бассейнах рек, зона питания которых расположена на склонах горы Казбек, что подтверждается картой аномалий стока (рис. 5.19).

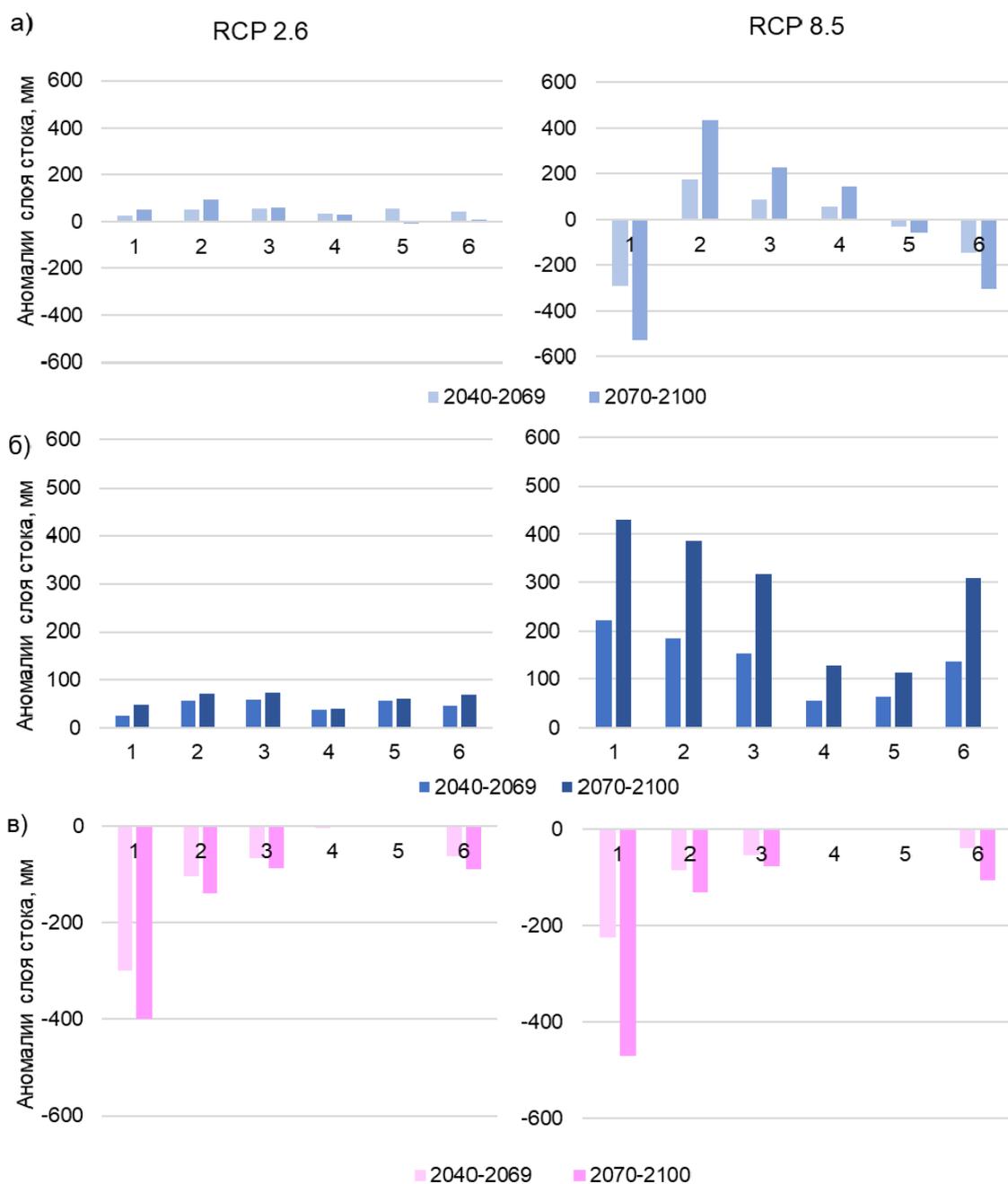


Рисунок 5.17 – Аномалии генетических составляющих годового стока (а – снеговой, б – дождевой, в – ледниковый сток) для различных замыкающих створов (1 – Джанкуат, 2 – Тырнауз, 3 – Заюково, 4 – Каменноостское, 5 – Котляревская, 6 – Чегем) при реализации сценариев RCP2.6 и RCP8.5

Механизм изменения генетических составляющих стока также будет зависеть от реализации конкретного сценария и от высотного расположения зоны ледникового и снегового питания. Уменьшение доли ледникового питания, рост снегового и дождевого питания для различных подбассейнов проиллюстрирован на диаграммах вклада генетических составляющих стока (рис. 5.18). По состоянию на период 2070–2099 гг. относительно базового исторического периода (1977–2005 гг.) на фоне повышения

температуры воздуха и деградации оледенения, при реализации любого климатического сценария ожидается снижение доли ледникового стока в диапазоне от 2 до 14% в зависимости от створа и сценария. При реализации «жесткого» сценария ожидается также уменьшение доли снегового питания и увеличение доли дождевого питания до 17%, что, главным образом, вызвано значительным увеличением жидких осадков. Также стоит отметить, что вслед за ростом температуры возрастает и испарение с поверхности водосбора. При реализации сценария RCP2.6 увеличение испарения по состоянию на последнюю треть XXI в. не так значительно, как и повышение температуры. Однако в сценарии RCP8.5 ожидается увеличение испарения на 150–250 мм/год. Но этого будет недостаточно, чтобы компенсировать прогнозируемое увеличение количества осадков, поэтому вклад дождевого стока будет увеличиваться.

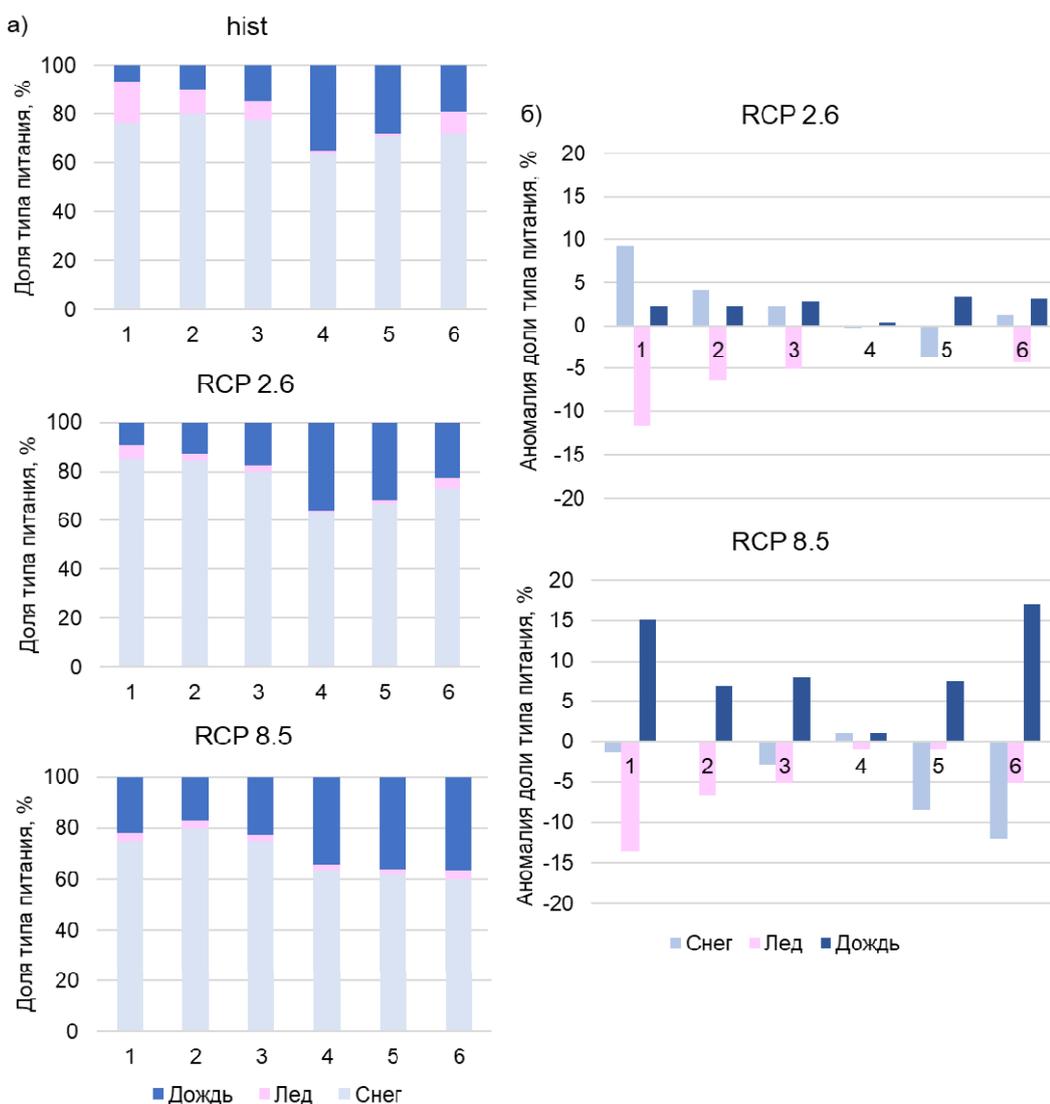


Рисунок 5.18 – Изменение генетических составляющих стока (а) и их аномалий (б) на период 2070-2099 гг. для различных замыкающих створов (1 – Джанкуат, 2 – Тырныауз, 3 – Заюково, 4 – Каменноостское, 5 – Котляревская, 6 – Чегем) при реализации сценариев RCP2.6 и RCP8.5

Пространственное распределение аномалий слоя годового стока за 2070-2100 гг. относительно базового исторического периода демонстрирует, что наиболее значительные положительные аномалии ожидаются в высокогорных зонах (рис. 5.19), особенно в пределах гор Эльбрус и Казбек, что обусловлено повышенным таянием льда и увеличением водоотдачи из снега. В пределах среднегорной и предгорной части бассейна поля аномалий слоя стока отличаются "пестротой", которая в основном связана с входным полем осадков, отличающемся 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, проявляющееся в выделении на схеме четырех районов: I – высокогорные территории с высотой от 3600 до 5642 м; II – ниже расположенные высокогорные территории с высотой от 2000 до 3600 м; III – среднегорья с высотой от 1000 до 2000 м; IV – низкогорья и равнины с высотой ниже 1000 м (таблица 5.2, рис. 5.19). В районе I в результате значительного увеличения водоотдачи из снежного покрова ожидается увеличение стока. В нижерасположенном районе II 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 районе III, ожидается значительное увеличение количества осадков и, соответственно, дождевого стока, что приведет к увеличению стока воды с водосборов. В низкогорьях и на равнинных территориях ожидается значительное увеличение испарения, поэтому даже на фоне увеличения осадков сток с удельных водосборов будет снижаться.

Таблица 5.2 – 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 ↓

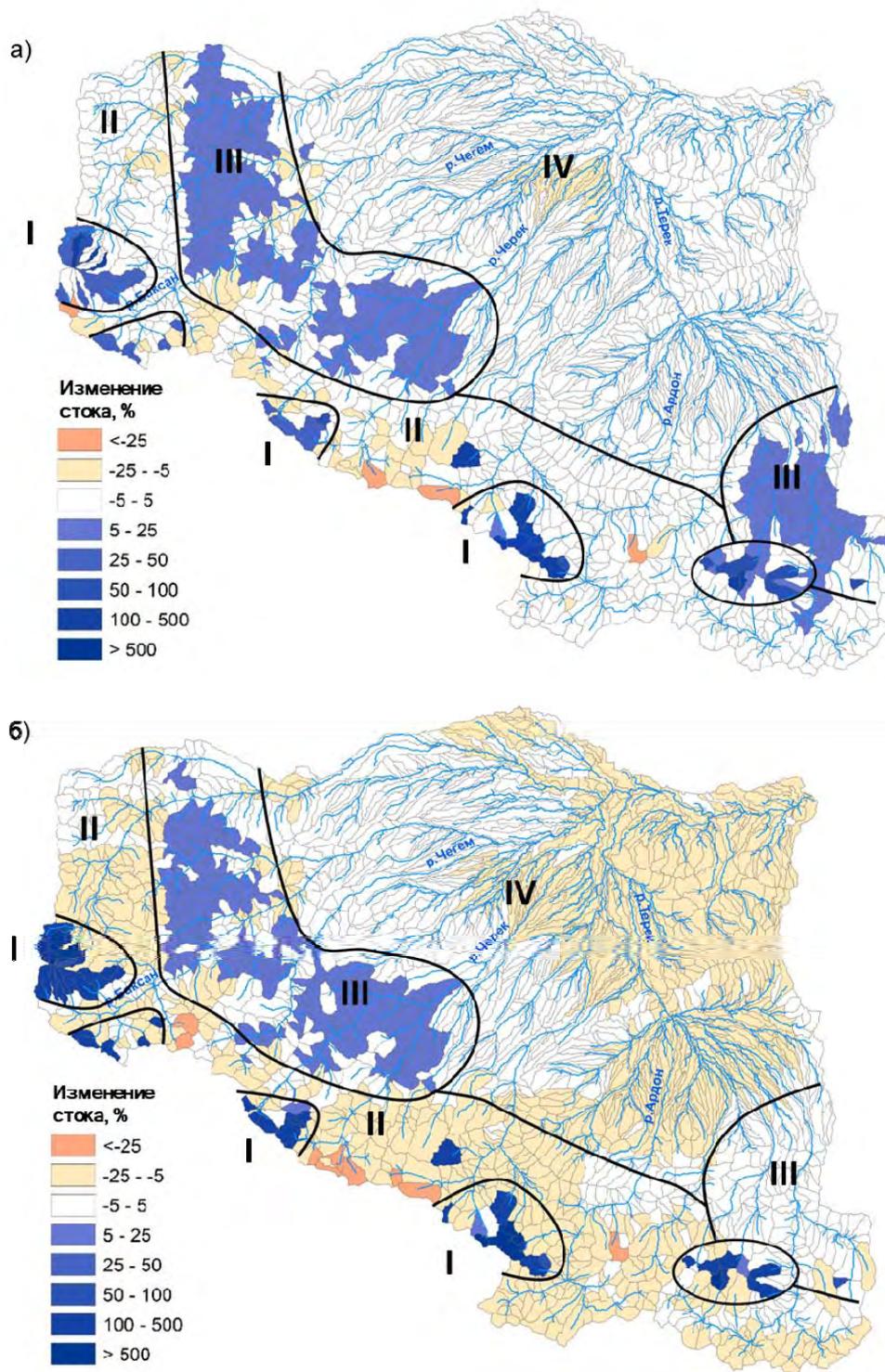


Рисунок 5.19 – Районирование высокогорной части бассейна р. Терек по зависимости аномалий стока от высотного расположения удельного водосбора при климатических сценариях RCP 2.6 (а) и RCP 8.5 (б) относительно базового исторического периода

В различных створах рек внутри исследуемого бассейна реакция на изменения стока воды с удельных водосборов различна. Направленность изменений объема стока в конкретных створах, как уже рассматривалось выше, будет зависеть от доли ледникового и снегового питания, а также от высотного расположения зоны снегового и ледникового

питания, возможные варианты трансформации механизмов формирования стока и результирующая направленность изменений годового стока обобщены в табл. 5.3.

Таблица 5.3 – Реакция стока рек на изменение факторов его формирования при климатическом сценарии RCP8.5*

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	<p>р. Баксан – гп Тырныауз</p>	<p>р. Малка – гп Каменноосткое</p>
	3600 < h < 5642 м Эльбрус, высокогорные территории Большого Кавказского хребта	<p>р. Баксан – гп Тырныауз</p>	<p>р. Баксан – гп Заюково</p>
RCP8.5	2000 < h < 3600 м	<p>р. Чегем – гп Нижний Чегем</p>	<p>р. Терек – гп Котляревская</p>

Примечания: *Т – температура воздуха, ICE – ледниковый сток, E – испарение, Sn – снеговой сток, P – дождевой сток, W – объем стока.

Например, 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 – гп Тырныауз, р. Чегем – гп Нижний Чегем). Однако, если в створе реки доля ледникового и снегового стока не столь значительна, то определяющим направлением изменений фактором станет увеличение количества осадков, которое приведет к увеличению общего стока (р. Баксан – гп Заюково, р. Терек – гп Котляревская, р. Малка – Каменноосткое). В сценарии RCP8.5, помимо доли снегового и ледникового питания, на сток будет значительно влиять расположение зоны их 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 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 – гп Тырныауз, р. Баксан – гп Заюково, р. Малка – гп Каменноостское). Однако, если зона снегового и ледникового питания расположена ниже, то объем стока в створах рек в связи со снижением снегового и ледникового стока будет уменьшаться (р. Чегем – гп Нижний Чегем). На сток рек, замыкающий створ которых расположен в низкогорьях и на равнинных территориях, большое влияние будет также оказывать увеличение испарения (р. Терек – гп Котляревская).

5.4. Результаты моделирования изменений внутригодового распределения стока с учетом изменения климата и оледенения в XXI в.

При сценарии RCP2.6 на всех исследуемых створах наблюдается трансформация гидрографа со сдвигом начала половодья на более ранние строки (рис. 5.20) и ростом расходов воды в марте, апреле и мае (рис. 5.21). Также наблюдается снижение стока в июне, июле и августе, и, наоборот, увеличение – в осенний период, что вызвано увеличением осадков и продолжающимся таянием снега и льда в связи с повышением температуры воздуха. В среднем уменьшение стока в летние месяцы может составить 10–15%, увеличение в осенние и весенние – 10–30%. Исключение представляет р. Малка, где ожидается уменьшение стока лишь в два месяца (июль и август), в остальные месяцы аномалии стока положительные. Во всех створах ожидается также снижение максимального среднемесячного расхода, за исключением р. Малка – с Каменноостское, где по результатам моделирования получено увеличение максимальных расходов воды вплоть до конца столетия. Отличия в реакции стока на изменения климата по посту р. Малка – с Каменноостское связаны с зоной питания, расположенной на северных склонах г. Эльбрус, и меньшей степенью деградации оледенения в пределах водосбора.

Таким образом, при сценарии RCP2.6 ожидаются не столько изменения общего годового стока рек высокогорной части бассейна р. Терек, сколько их внутригодовая трансформация – «распластывание» гидрографа со смещением сроков наступления половодья, объемов стока и средних максимальных расходов. Подобная трансформация гидрографов наблюдается и в настоящее время (гл. 1.4). Сдвиг волны половодья вызывает уменьшение максимальных расходов воды, которые имеют стоково-ливневой генезис и преимущественно формируются за счет июльских экстремальных паводков. Продолжающаяся деградация оледенения снижает расходы воды на спаде половодья, когда начинает таять освободившийся от снега лед. По результатам моделирования также ожидается повышение осеннего стока, что связано с увеличением таяния вечных снегов и жидких осадков в данный период.

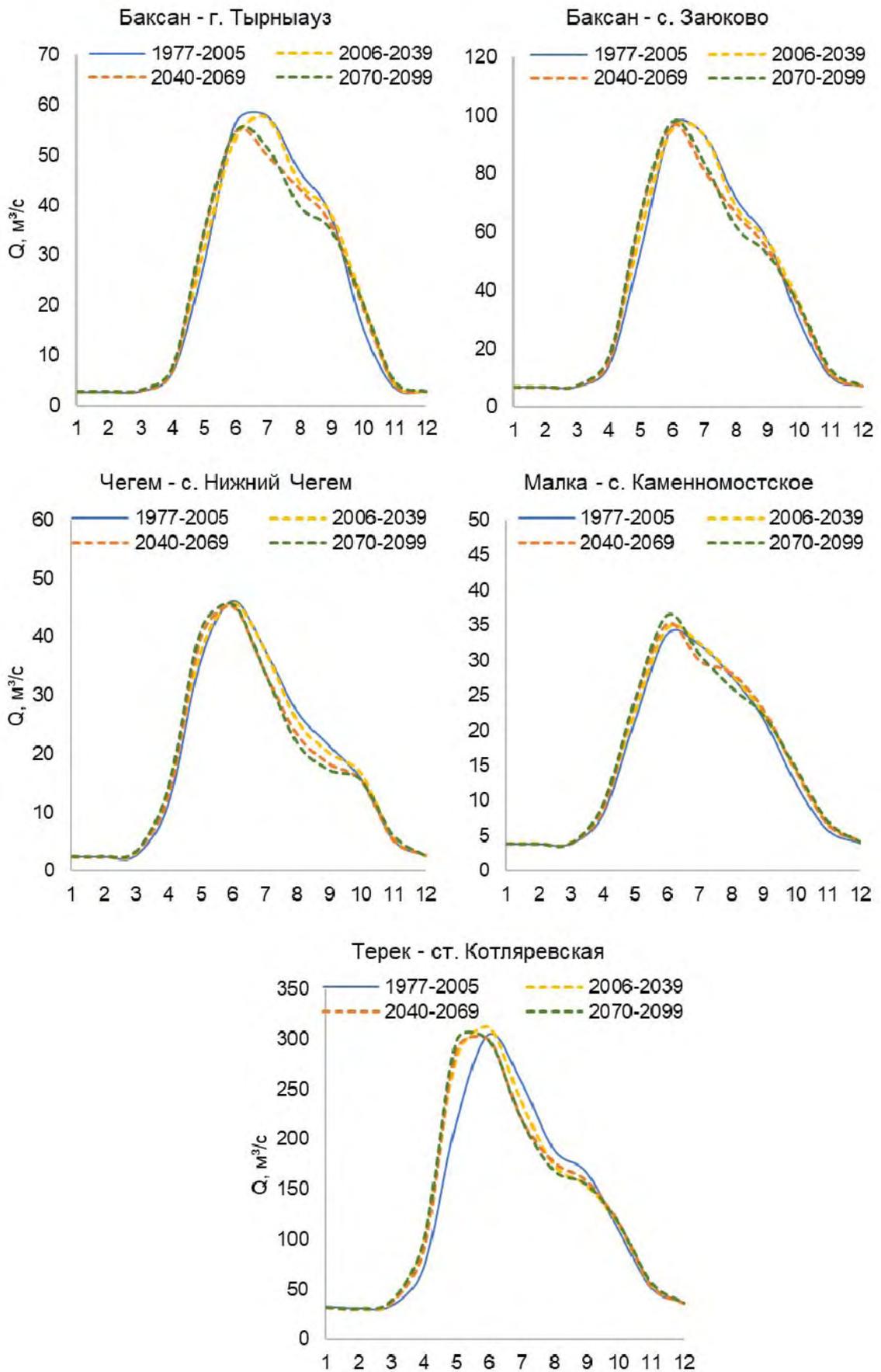


Рисунок 5.20 – Трансформация внутригодового хода стока при сценарии RCP 2.6 для различных створов в высокогорной части бассейна р. Терек

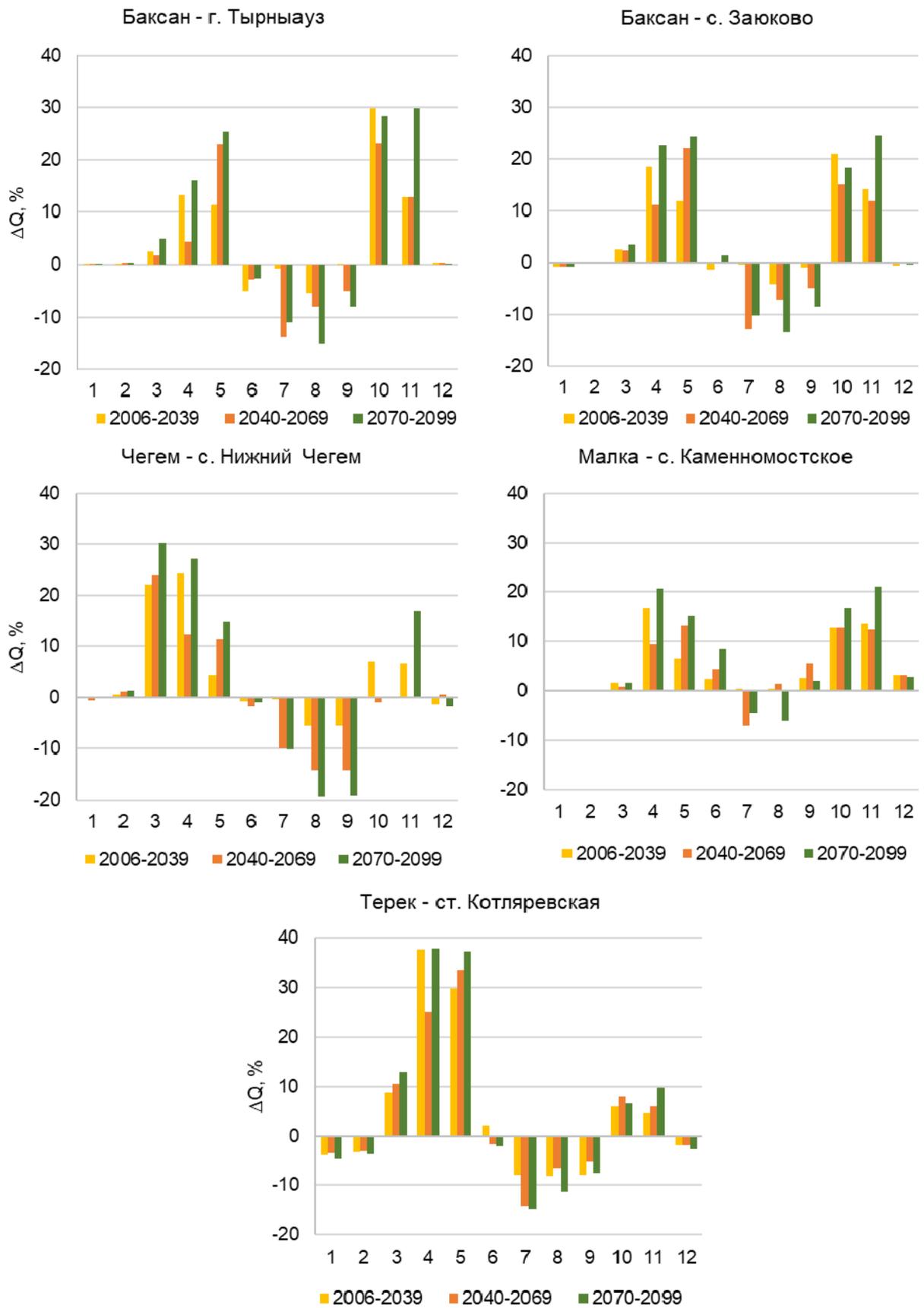


Рисунок 5.21 – Аномалии внутригодового распределения стока (%) при сценарии RCP 2.6 относительно базового исторического периода для различных створов в высокогорной части бассейна р. Терек

При реализации сценария RCP8.5 ожидаются более значительные изменения внутригодового распределения стока (рис. 5.22). Тенденция «рапластывания» гидрографа проявляется даже более ярко, чем для сценария RCP2.6. В последнее тридцатилетие XXI в., по результатам моделирования, ожидается сдвиг начала половодья на март, смещение максимальных расходов воды на май, снижение расходов в летний период. Также увеличивается сток в осенний период, что связано с таянием свежеснежавшего снега, продолжающимся таянием вечных снегов, а также с увеличением жидких осадков. Стоит отметить, что при «жестком» сценарии максимальный расход воды уменьшается во всех исследуемых створах.

Наибольшие изменения ожидаются в конце столетия в весенние и осенние периоды (рис. 5.23), что соответствует максимальным изменениям количества осадков, температуры воздуха и объемам снеготаяния. Например, увеличение среднемесячных расходов воды составит 80–210% в апреле-мае и октябре-ноябре в створе р. Баксан на гп Тырнауз (рис. 6б) и 90–150% в марте-апреле и ноябре в створе р. Чегем на гп Нижний Чегем. В то же время, сток в летний период в среднем уменьшится – на 5–15% в высокогорных створах р. Баксан и р. Малка, и до 40% в створах р. Чегем на гп Нижний Чегем и р. Терек на гп Котляревская, в бассейнах которых ожидается наибольшее сокращение площади оледенения, что будет являться причиной наибольших изменений летнего стока в сценарии RCP8.5.

Как показывают диаграммы вклада генетических составляющих стока (рис. 5.24), 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. Однако 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, где будет продолжаться таяние вечных снегов (р. Баксан – г. Тырнауз), 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 таких экстремальных событий в горах, как прорывные паводки и сели, что ведет к росту опасности затопления речных долин в осенний период.

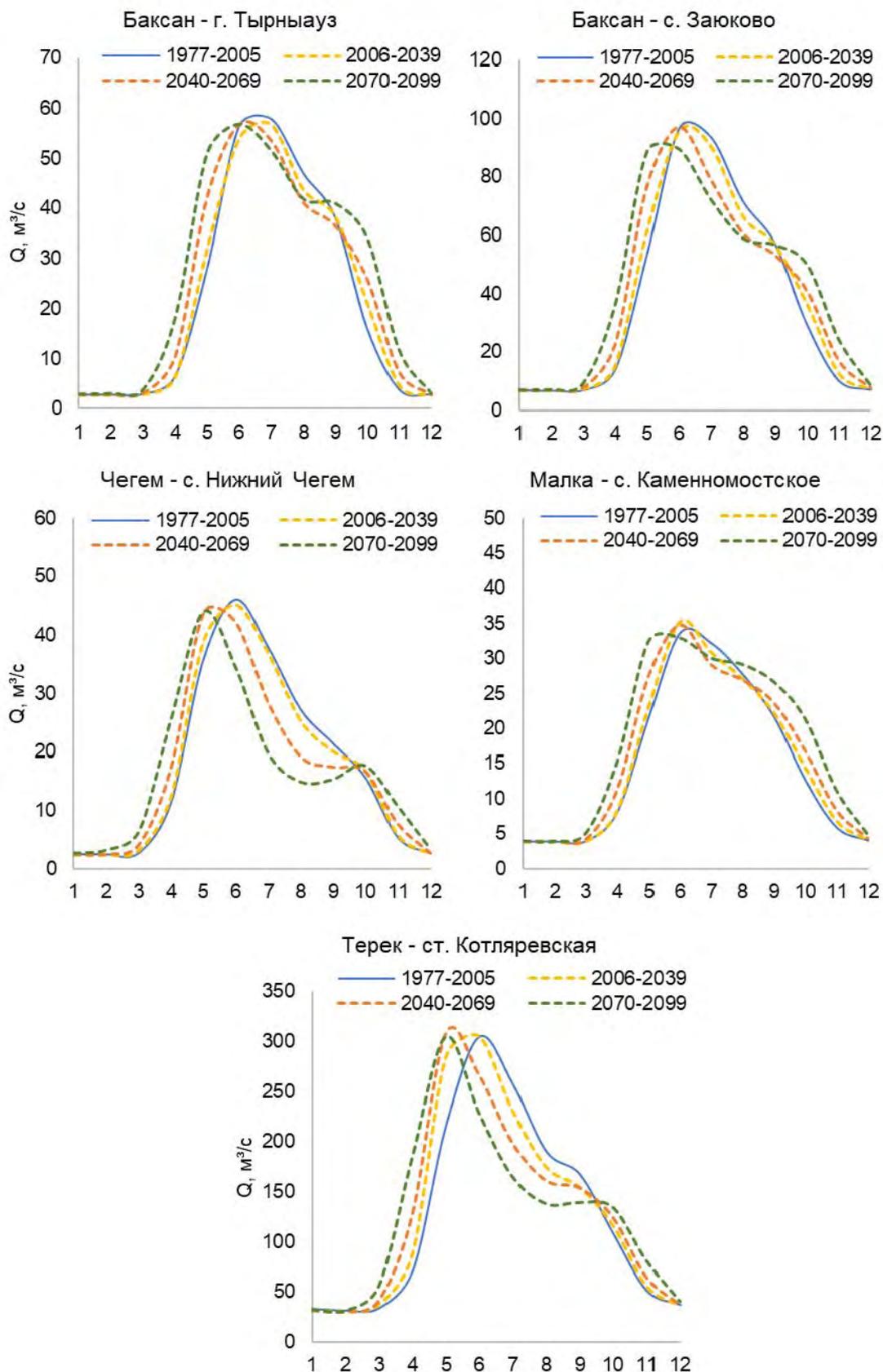


Рисунок 5.22 – Трансформация внутригодового хода стока при сценарии RCP 8.5 для различных створов в высокогорной части бассейна р. Терек

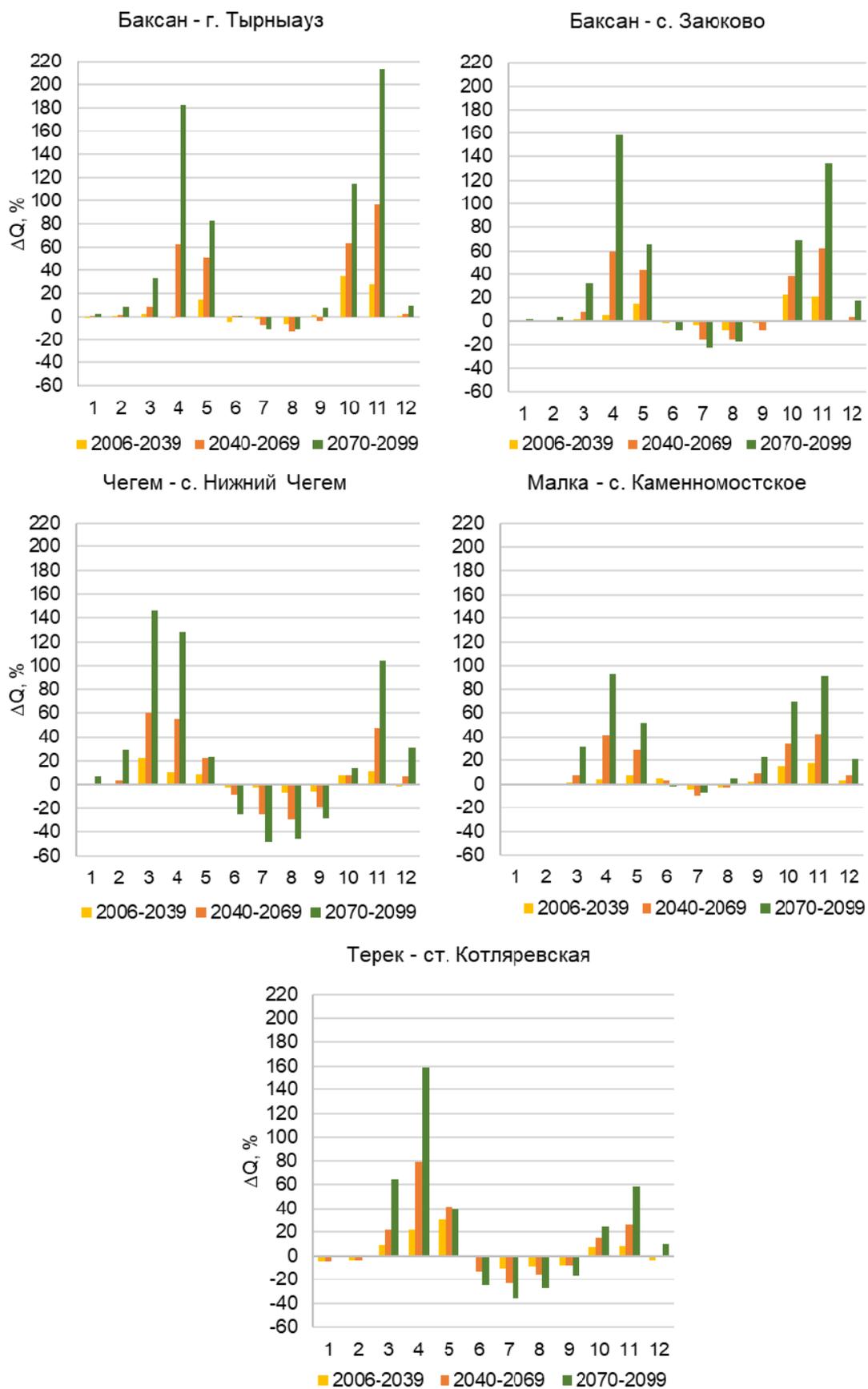


Рисунок 5.23 – Аномалии внутригодового распределения стока (%) при сценарии RCP 8.5 относительно базового исторического периода для различных створов в высокогорной части бассейна р. Терек

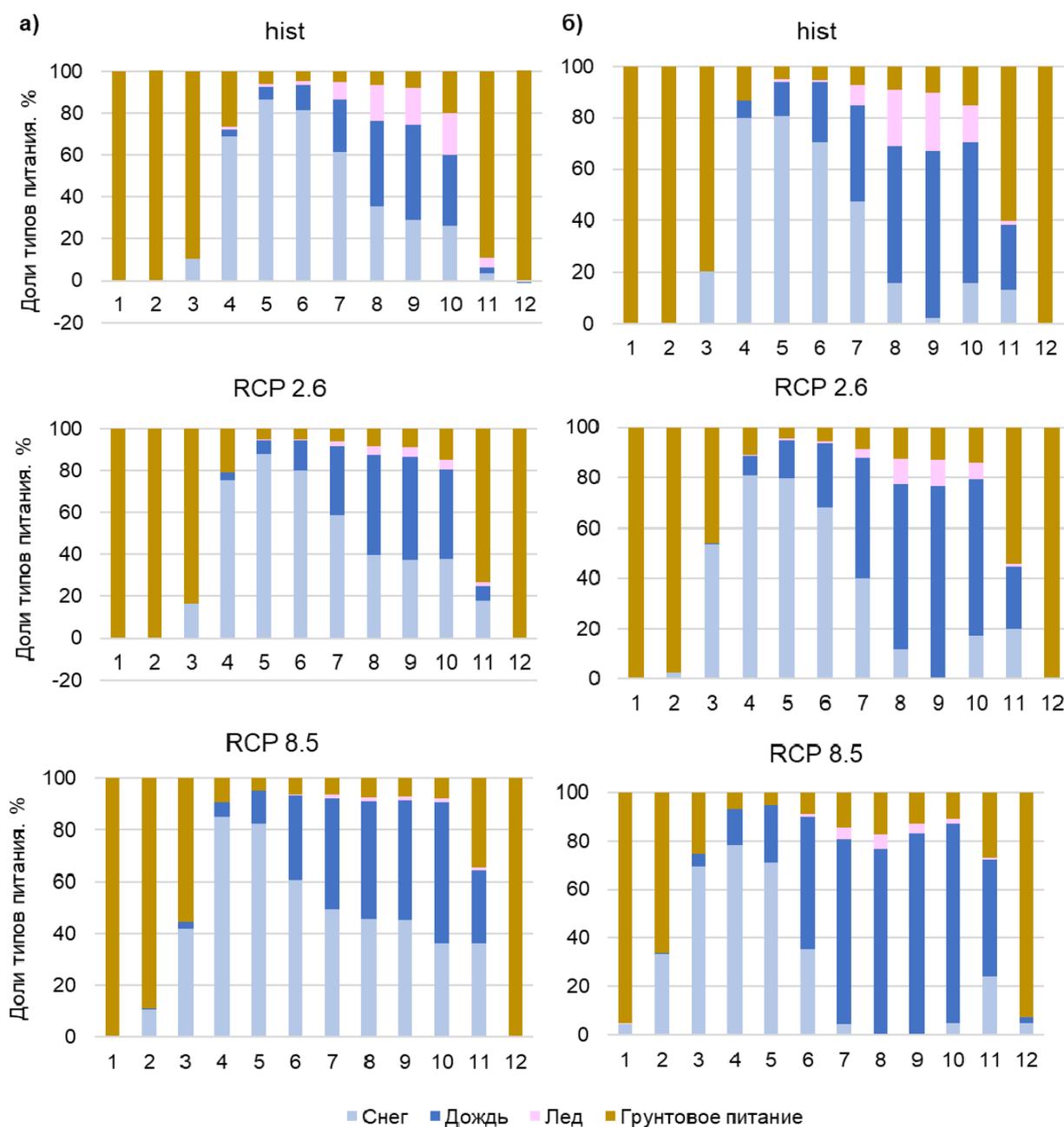


Рисунок 5.24 – Изменение генетических составляющих стока (%) по состоянию на исторический период 1977-2005 гг. и период 2070-2099 гг. для различных замыкающих створов (а – р. Баксан (г. Тырнауз), б – р. Чегем (с. Нижний Чегем)) при реализации сценариев RCP2.6 и RCP8.5

Общее графическое представление выявленных изменений внутригодового распределения стока и факторов, их определяющих, представлено на рис. 5.25. Ожидается сдвиг начала половодья на более ранние сроки в результате сдвига начала снеготаяния. По причине снижения дождевого стока в период снеготаяния уменьшится максимальный сток, а также снизится сток на спаде половодья в результате снижения ледникового стока. Однако, ожидается увеличение дождевого и снегового стока в осенний период.



Рисунок 5.25 – Схематизация изменений внутригодового распределения стока в пределах высокогорной части бассейна р. Терек

5.5. Обобщение

В данной главе был использован комплекс моделей гидрометеорологического блока с целью оценить возможные изменения характеристик речного стока на фоне меняющегося климата и деградации горного оледенения. Расчетные изменения площади оледенения, полученные по глобальной гляциологической модели GloGEMflow-debris, и региональные климатические изменения, оценка которых была выполнена по данным проекта CORDEX, были использованы в численных экспериментах с моделью ECOMAG.

Была выполнена оценка вероятных изменений стока р. Терек в XXI в. с учетом изменений климата и оледенения в бассейне. Показано, что изменение годового стока составит от -2 до $+5\%$ в сценарии RCP2.6 и от -8 до $+14\%$ – в сценарии RCP8.5. Направленность изменений стока в конкретных подбассейнах будет существенно зависеть от высотного расположения зоны снегового и ледникового питания, определяющего интенсивность их деградации. Так, в сценарии RCP8.5 сток р. Чегем начнет значительно снижаться во второй половине XXI в. При этом увеличение объемов стока рек Малки и Баксана, которые преимущественно питаются талыми водами ледников и снегов Эльбруса, будет продолжаться вплоть до конца столетия. Однако, это увеличение, главным образом, будет определяться ростом снегового стока 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 объемов стока в летний период и их увеличение в осенние месяцы. На фоне повышения температуры воздуха доля ледникового стока повсеместно снижается, начало периода водоотдачи из снежного покрова сдвигается на более ранние месяцы. Также прогнозируется увеличение дождевого стока в летний и осенний период, что может увеличить вероятность прорыва ледниковых озер и повышение селевой активности.

Заключение

В рамках данной работы были проанализированы современные тенденции изменения основных гидрологических и метеорологических характеристик в бассейне р. Терек, что создало основу и понимание того, как изменяется климат, оледенение и сток в исследуемом регионе. Согласно полученным результатам, 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.

По результатам анализа динамики и изменений стока, среднегодовые расходы воды за 1970–2018 г. 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.

Была собрана и обработана информационная основа для адаптации модели формирования стока ECOMAG в бассейне р. Терек (гидрометеорологические данные, карты подстилающей поверхности). Выполнена схематизация бассейна, построена речная сеть. Произведена калибровка и валидация модели, которые по критериям качества (NSE, BIAS) показали хорошие и удовлетворительные результаты моделирования.

Обширные исследования по оценке возможностей учета в ИМК ECOMAG особенностей высокогорных территорий показали, что 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. 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 спектрометра 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.

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.

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.

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. Тырнауз, р. Баксан – с. Заюково, р. Малка – с. Каменноостское).

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.

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.

Список литературы

1. *Авессаломова И.А., Петрушина М.Н., Хорошеев А.В.* Горные ландшафты: структура и динамика: учебное пособие. М.: Изд-во Московского университета, 2002. 158 с.
2. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). // СевКавНИИВХ: офиц. сайт. 2014. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения 25.10.2021).
3. *Алексюк А.И., Беликов В.В.* Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологий Compute Unified Device Architecture (на графических процессорах NVIDIA) // Роспатент. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017660266 от 20.09.2017.
4. Атлас Кабардино-Балкарской республики / сост. и подгот. Новосибир. карт. ф-кой Роскартографии в 1994-1997 гг.; Под ред. Н.К. Любимова, Л.Г. Уйманова. М.: ФСГК, 1997. 42 с.
5. *Бориц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Прогнозирование стока рек России. М.: Гидрометцентр России, 2023. 200 с.
6. *Волошина А.П.* Метеорология горных ледников // Метеорология и гидрология. 2001. Вып. 92. С. 3–138.
7. *Данилов-Данильян В. И., Хранович И. Л.* Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. Научный мир Москва, 2010. 233 с.
8. *Золотарев Е.А., Харьковец Е.Г.* Эволюция оледенения Эльбруса после малого ледникового периода // Лед и снег. 2012. №2. С. 15–22.
9. *Кидяева В.М., Петраков Д.А., Крыленко И.Н., Алейников А.А., Штоффел М., Граф К.* Опыт моделирования прорыва Башкаринских озер // Геориск. 2018. Т. 12. № 2. С. 38–46.
10. *Ковалев П.В.* Следы древнего оледенения на северном склоне Центрального Кавказа и гляциологические наблюдения (1957-1958 гг.) // Информационный сборник о работах по метеорологии, гидрологии, географии. М.: Московский государственный университет, 1964. № 10. С. 112-131.
11. *Корнева И.А., Рыбак О.О.* Проекция климата на Кавказе (результаты эксперимента cordex) // Системы контроля окружающей среды. 2020. №4. С. 5–12.
12. *Корнилова Е.Д., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Мотовилов Ю.Г., Атабиева Ф.А., Кучменова И.И.* Моделирование водного режима рек с высокой долей ледникового питания (на примере бассейна р. Баксан) // Водные ресурсы. 2023. Т.50. №4. С. 477–484.

13. *Корнилова Е.Д., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Мотовилов Ю.Г., Корнева И.А., Постникова Т.Н., Рыбак О.О.* Водный режим рек с высокой долей ледникового питания в условиях меняющегося климата (на примере высокогорной части бассейна р. Терек) // Сборник докладов Международной научной конференции «Пятое Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен». Санкт-Петербург: Изд-во ВВМ, 2023. С. 239–244.
14. *Корнилова Е.Д., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Богаченко Е.М.* Моделирование экстремальных гидрологических событий в бассейне р. Баксан // Сборник докладов Международной научной конференции «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению». Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2020. С. 296–301.
15. *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.
16. *Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г.* Формирование речного стока. М.: Наука, 1983. 216 с.
17. *Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Назаров Н.А.* Чувствительность гидрологических систем. М.: Наука, 1990. 143 с.
18. *Ледники и климат Эльбруса / Отв. ред. В. М. Михаленко.* М.; СПб.: Нестор-История, 2020. 372 с.
19. *Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю.* Река Кубань: Гидрография и режим стока. СПб.: Гидрометиздат, 2005. 498 с.
20. *Лурье П.М.* Водные ресурсы и водный баланс Кавказа. СПб.: Гидрометиздат, 2002. 500 с.
21. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том 1. Выпуск 26. Бассейны Терека, Кумы, Самура, Сулака. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 298 с.
22. *Морейдо В. М., Калугин А. С.* Оценка возможных изменений водного режима реки Селенги в XXI в. на основе модели формирования стока // Водные ресурсы. 2017. Т. 44, № 3. С. 275-284.
23. *Морейдо В.М., Амербаев А.Н.* База данных для регионального гидрологического моделирования на территории Российской Федерации // Роспатент. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020622193 от 31.10.2020.
24. *Мотовилов Ю. Г., Гельфан А. Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М: Российская академия наук, 2018. 300 с.

25. *Мотовилов Ю.Г., Морейдо В.М., Миллионщикова Т.Д.* Приближенная формула для расчета дефицита влажности воздуха при оценках испарения в моделях формирования стока на реках России // *Водные ресурсы*. 2022. Т. 49. № 6. С. 753–765.
26. *Мотовилов Ю.Г.* Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах, 1. Алгоритмы генерализации и осреднения // *Водные ресурсы*. 2016. Т. 43. №3. С. 243–253.
27. *Мотовилов Ю.Г.* Модель ЕСОМАГ // Роспатент. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013610703 от 09.01.2013.
28. *Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Рототаева О.В., Шахгеданова М.В.* Реакция ледников Центрального Кавказа в 2001–2010 гг. на изменения температуры и количества осадков // *Лед и Снег*. 2013. Т. 53. № 1. С. 26–33.
29. Отчет по научно-исследовательской работе «Разработка схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов бассейна р. Терек». Рук. Н.И. Алексеевский. Рукопись. М.: Географический факультет МГУ, 2006. 235 с.
30. *Постникова Т., Рыбак О.* Глобальные гляциологические модели: новый этап в развитии методов прогнозирования эволюции ледников. Часть 1. Общий подход и архитектура моделей // *Лед и снег*. 2021. Т. 61. № 4. С. 620–636.
31. *Постникова Т., Рыбак О.* Глобальные гляциологические модели: новый этап в развитии методов прогнозирования эволюции ледников. Часть 2. Постановка экспериментов и практические приложения // *Лед и снег*. 2022. Т. 62. № 2. С. 287–304.
32. Почвенная карта Северо-Осетинской АССР / сост. В.Д. Калмаковым и др.; отв. ред. Э.Н. Молчанов, К.Х. Бясов; сост. и подгот. к печати Тбилисской картогр. ф-кой в 1989 г. М.: ГУГК, 1990.
33. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 8: Северный Кавказ. / Под ред. Панов В.Д., Псарева Т.В.; Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Сев.-Кав. упр. гидрометеорол. службы. Ин-т географии АН СССР. Ленинград: Гидрометеиздат, 1973. 95 с.
34. Ресурсы поверхностных вод СССР: Каталог ледников СССР. Т. 8: Северный Кавказ / Под ред. Панов В.Д., Кравцова В.И. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 123 с.
35. Ресурсы поверхностных вод СССР: Основные гидрологические характеристики. Т. 8: Северный Кавказ. / Под ред. А. Н. Алексеевой; Сев.-Кавказское упр. гидрометеорол. службы. 1975. 452 с.
36. *Рец Е.П., Фролова Н.Л., Поповнин В.В.* Моделирование таяния поверхности горного ледника // *Лед и Снег*. 2011. № 4 (116). С. 24–31.

37. *Рототаева О.В., Носенко Г.А., Керимов А.М., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И., Никитин С.А., Керимов А.А., Тарасова Л.Н.* Изменения баланса массы ледника Гарабаши (Эльбрус) на рубеже XX–XXI вв. // *Лед и снег*. 2019. Т. 59, № 1. С. 5–22.
38. *Рыбак Е.А., Рыбак О.О.* Анализ региональных особенностей структуры водопользования на Северном Кавказе. Часть 1. Водообеспеченность и водопотребление // *Системы контроля окружающей среды*. 2021. Т. 44. № 2. С. 96–105.
39. *Торопов П.А., Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Морозова П.А., Шестакова А.А.* Температурный и радиационный режим ледников на склонах Эльбруса в период абляции за последние 65 лет // *Лед и снег*. 2016. Т. 56. № 1. С. 5–19.
40. *Хомякова В.А., Рец Е.П., Корнилова Е.Д., Козачек А.В., Екайкин А.А.* Использование тяжелых изотопов кислорода и водорода в качестве естественных трассеров для определения доли талого стока в бассейне горной реки // *Сборник докладов международной научной конференции «Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен»*. Санкт-Петербург, 2023 год / под ред. О. М. Макарьевой, П.А. Никитиной. Санкт-Петербург: ООО Издательство ВВМ, 2023. С. 603-608.
41. *Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М. Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М.* Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // *Криосфера Земли*. 2018. Т. 22. № 2. С. 70–80.
42. *Чижова Ю.Н., Буданцева Н.А., Рец Е.П., Лошакова Н.А., Поповнин В.В., Васильчук Ю.К.* Вариации изотопно-кислородного состава талого стока ледника Джанкуат на Центральном Кавказе // *Вест. Моск. Ун-та. Сер.5. География*. 2014. № 6. С. 48–56.
43. *Чижова Ю.Н., Рец Е.П., Васильчук Ю.К., Токарев И.В., Буданцева Н.А., Киреева М.Б.* Два подхода к расчету расчленения гидрографа стока реки с ледниковым питанием с помощью изотопных методов // *Лед и снег*. 2016. Т. 56. № 2. С. 161–168.
44. *Addor N., Rössler O., Köplin N., Huss M., Weingartner R., Seibert J.* Robust changes and sources of uncertainty in the projected hydrological regimes of Swiss catchments // *Water Resources Research*. 2014. Vol. 50. No. 10. P. 7541–7562.
45. *Adler C., Huggel C., Orlove B., Nolin A.* Climate change in the mountain cryosphere: Impacts and responses // *Regional Environmental Change*. 2019. Vol. 19. P. 1225–1228.
46. *Anacona P.I., Mackintosh A., Norton K.* Reconstruction of a glacial lake outburst flood (GLOF) in the Engaño valley, Chilean Patagonia: Lessons for GLOF risk management // *Sci. Total Environ*. 2015. Vol. 527–528. P. 1–11.

47. *Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R.* Large area hydrologic modeling and assessment: Part 1. Model development // *Journal of the American Water Resources Association*. 1998. Vol. 34. P. 73–89.
48. *Barnett T.P., Adam J.C., Lettenmaier D.P.* Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions // *Nature*. 2005. Vol. 438. No. 7066. P. 303–309.
49. *Belikov V., Militeev A.* Two-layer mathematical model of catastrophic floods. // *Comput. Technol.* 1992. Vol. 1. P. 167–174.
50. *Benn D.I., Lehmkühl F.* Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high-mountain environments // *Quaternary International*. 2000. Vol. 65–66. P. 15–29.
51. *Bergström S.* Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. 1976.
52. *Bliss A., Hock R., Radic V.* Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change // *J Geophys Res Earth Surf*. 2014. Vol. 119. No. 4. P. 717–730.
53. *Bozhinskiy A.N., Krass M.S., Popovnin V.V.* Role of debris cover in the thermal physics of glaciers // *J. Glaciol.* 1986. Vol. 32. P. 255–266.
54. *Braithwaite R.J.* Positive degree-day factors for ablation on the Greenland ice sheet studied by energy-balance modelling // *J. Glaciol.* 1995. Vol. 41. P. 153–160.
55. *Carrivick J.L., Tweed F.S.* A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods // *Global and Planetary Change*. 2016. Vol. 144. P. 1–16.
56. *Chernomorets S., Petrakov D., Aleynikov A.A., Bekkiev M.Y., Viskhadzhiyeva K., Dokukin M.D., Kalov R., Kidyayeva V., Krylenko V.V., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Rets E.P., Savernyuk E.A., Smirnov A.M.* The outburst of Bashkara glacier lake (Central Caucasus, Russia). // *Earth's Cryosphere*. 2018. Vol. 22. No. 2. P. 61–70.
57. CORDEX EXPERIMENT: <https://cordex.org> (дата обращения: 18.06.2020).
58. *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. Vol. 51. No. 6. P. 4727–4750.
59. *Endrizzi S., Gruber S., Dall'Amico M., Rigon R.* GEOtop 2.0: simulating the combined energy and water balance at and below the land surface accounting for soil freezing, snow cover and terrain effects // *Geoscientific Model Development*. 2014. Vol. 7. No. 6. P. 2831–2857.
60. *Etter S., Addor N., Huss M., Finger D.* Climate change impacts on future snow, ice and rain runoff in a Swiss mountain catchment using multi-dataset calibration // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2017. Vol. 13. P. 222–239.

61. *Farinotti D., Usselman S., Huss M., Bauder A., Funk M.* Runoff evolution in the Swiss Alps: Projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios // *Hydrological Processes*. 2012. Vol. 26. No. 13. P. 1909–1924.
62. *Ferguson J.C., Vieli A.* Modelling steady states and the transient response of debris-covered glaciers // *The Cryosphere*. 2021. Vol. 15. P. 3377–3399.
63. *Finger D., Hugentobler A., Huss M., Voinesco A., Wernli H., Fischer D., Weber E., Jeannin P.-Y., Kauzlaric M., Wirz A., Vennemann T., Hüsler F., Schädler B., Weingartner R.* Identification of glacial meltwater runoff in a karstic environment and its implication for present and future water availability // *Hydrology and earth system sciences*. 2013. Vol. 17. No. 8. P. 3261–3277.
64. *Finger D., Vis M J.P., Huss M., Seibert J.* The value of multiple data set calibration versus model complexity for improving the performance of hydrological models in mountain catchments // *Water Resources Research*. 2015. Vol. 51. No. 4. P. 1939–1958.
65. *Gafurov A., Bárdossy A.* Cloud removal methodology from MODIS snow cover products // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009. P. 1361–1373.
66. *Gelfan A., Gustafsson D., Motovilov Y., Arheimer B., Kalugin A., Krylenko I., Lavrenov A.* Climate change impact on the water regime of two great arctic rivers: modeling and uncertainty issues // *Climatic Change*. 2016. Vol. 141. P. 499–515.
67. *Gelfan A., Motovilov Yu., Krylenko I., Moreido V., Zakharova E.* Testing the robustness of the physically-based ECOMAG model with respect to changing conditions // *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 60. P. 1266–1285.
68. *Gurtz J., Baltensweiler A., Lang H.* Spatially distributed hydrotope-based modelling of evapotranspiration and runoff in mountainous basins // *Hydrological Processes*. 1999. Vol. 13. No. 17. P. 2751–2768.
69. *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. Vol. 73. No. 3–4. P. 161–171.
70. *Hamed K.H., Rao A.R.* A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data // *Journal of Hydrology*. 1998. Vol. 204. P. 182–196.
71. *Harrison S., Kargel J. S., Huggel C., Reynold J., Shugar D. H., Betts R. A., Emmer A., Glasser N., Haritashya U. K., Klimeš J., Reinhardt L., Schaub Y., Wiltshire A., Regmi D., Vilímek V.* Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods // *The Cryosphere*. 2018. Vol. 12. P. 1195–1209.
72. *Herreid S., Pellicciotti F.* The state of rock debris covering Earth's glaciers // *Nature Geoscience*. 2020. Vol. 13. P. 621–627.

73. *Hock R.A.* distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation // *J. Glaciol.* 1999. Vol. 45. No. 149. P. 101–111.
74. *Hock R.* Temperature index melt modelling in mountain areas // *Journal of Hydrology.* 2003. Vol. 282. No. 1–4. P. 104–115.
75. *Hock R., Bliss A., Marzeion B., Giesen R.H., Hirabayashi Y., Huss M., Radić V., Slangen A.B.* GlacierMIP—A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections // *Journ. of Glaciology.* 2019. Vol. 65. No. 251. P. 453–467.
76. *Hoeg S., Uhlenbrook S., Leibundgut C.* Hydrograph separation in a mountainous catchment—combining hydrochemical and isotopic tracers // *Hydrological Processes.* 2000. Vol. 14. No. 7. P. 1199–1216.
77. *Horton P., Schaefli B., Mezghani A., Hingray B., Musy A.* Assessment of climate change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty // *Hydrological Processes: An International Journal.* 2006. Vol. 20. No. 10. P. 2091–2109.
78. *Huss M., Farinotti D., Bauder A., Funk M.* Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate // *Hydrological processes.* 2008. Vol. 22. No. 19. P. 3888–3902.
79. *Huss M., Fischer M.* Sensitivity of very small glaciers in the Swiss Alps to future climate change // *Front. Earth Sci.* 2012. Vol. 6. P. 1–17.
80. *Huss M., Hock R.* Global-scale hydrological response to future glacier mass loss // *Nat. Clim. Chang.* 2018. Vol. 8. No. 2. P. 135–140.
81. *Huss M., Jouviet G., Farinotti D., Bauder A.* Future high-mountain hydrology: a new parameterization of glacier retreat // *Hydrology and Earth System Sciences.* 2010. Vol. 14. No. 5. P. 815–829.
82. IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge University Press: 2014. 1535 pp.
83. *Jenicek M., Seibert J., Staudinger M.* Modeling of future changes in seasonal snowpack and impacts on summer low flows in alpine catchments // *Water Resources Research.* 2018. Vol. 54. No. 1. P. 538–556.
84. *Jones J.A.* Hydrologic responses to climate change: Considering geographic context and alternative hypotheses // *Hydrol Process.* 2011. Vol. 25. P. 1996–2000.
85. *Junghans N., Cullmann J., Huss M.* Evaluating the effect of snow and ice melt in an Alpine headwater catchment and further downstream in the River Rhine // *Hydrological Sciences Journal.* 2011. Vol. 56. No. 6. P. 981–993.

86. *Justice C.O., Townshend J., Vermote E., Masuoka E., Wolfe R.E., Saleous N., Roy D.P., Morisette J.T.* An overview of MODIS Land data processing and product status // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 83. P. 3–15.
87. *Kalugin A.S., Motovilov Y.G.* Runoff formation model for the Amur River basin // *Water Resources*. 2018. Vol. 45. No. 2. P. 149–159.
88. *Kanungo T.* An efficient k-means clustering algorithm: Analysis and implementation / T. Kanungo, D.M. Mount, N. Netanyahu // *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2002. Vol. 24. P. 881–892.
89. *Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Y.G., Bogachenko E.M., Krylenko I.V., Petrakov D.A.* Modeling of extreme hydrological events in the baksan river basin, the central Caucasus, Russia. // *Hydrology*. 2021. V. 8. No. 24. P. 1–24.
90. *Kraaijenbrink P.D., Bierkens M., Lutz A., Immerzeel W.* Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers // *Nature*. 2017. Vol. 549. P. 257–260.
91. *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. Vol. 549. P. 257–260.
92. *Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D.* Volume changes of Elbrus glaciers from 1997 to 2017 // *Frontiers in Earth Science*. 2019. Vol. 7. P. 153.
93. *Kutuzov S., Shahgedanova M., Krupskaya V., Goryachkin S.* Optical, geochemical and mineralogical characteristics of light-absorbing impurities deposited on Djankuat Glacier in the Caucasus Mountains // *Water*. 2021. Vol. 13. P. 1–14.
94. *Lambrecht A., Mayer C., Hagg W., Popovnin V., Rezepkin A., Lomidze N., Svanadze D.* A comparison of glacier melt on debris-covered glaciers in the northern and southern Caucasus // *The Cryosphere*. 2011. Vol. 5. P. 525–538.
95. *Lehning M., Bartelt P., Brown B., Fierz C., Satyawali P.* A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part II. Snow microstructure // *Cold regions science and technology*. 2002. Vol. 35. No. 3. P. 147–167.
96. *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. Vol. 10. P. 463.
97. *Marty C., Schögl S., Bavay M., Lehning M.* How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps // *Cryosphere*. 2017. Vol. 11. P. 517–529.
98. *Marzeion B., Hock R., Anderson B.A., Bliss A., Champollion N., Fujita K., Huss M., Immerzeel W.W., Kraaijenbrink P.D., Malles J.H., Maussion F., Radic V., Rounce D.R., Sakai A., Shannon S., Wal R.V., Zekollari H.* Partitioning the Uncertainty of Ensemble

- Projections of Global Glacier Mass Change // *Earth's Future*. 2020. Vol. 8. No. 7. P. e2019EF001470.
99. *Marzeion B., Jarosch A., Hofer M.* Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers // *The Cryosphere*. 2012. Vol. 6. No. 6. P. 1295–1322.
 100. *Mergili M., Pudasaini S.P., Emmer A., Fischer J.T., Cochachin A., Frey H.* Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru) // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020. Vol. 24. P. 93–114.
 101. *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 // *Proc Natl Acad Sci.* 2017. Vol. 114. No. 37. P. 9770–9778.
 102. *Motovilov Y.G., Gottschalk L., Engeland L., Rodhe A.* Validation of a distributed hydrological model against spatial observation // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1999. Vol. 98–99. P. 257–277.
 103. *Motovilov Yu., Kalugin A., Gelfan A.* An ECOMAG-based regional hydrological model for the Mackenzie River basin // *Geophysical Research Abstracts*. 2017. Vol. 19. P. 8064.
 104. *O'Brien J.S., Julien P.Y., Fullerton W.T.* Two dimensional water flood and mudflow simulation. // *J. Hydraul. Eng.* 1993. Vol. 119. P. 244–261.
 105. *Omani N., Srinivasan R., Karthikeyan R., Smith P.* Hydrological modeling of highly glacierized basins (Andes, Alps, and Central Asia) // *Water*. 2017. Vol. 9. No. 2. P. 111.
 106. *Paterson W. S. B.* *The physics of glaciers* (third edition). Oxford: Pergamon Press, 1994. 480 p.
 107. *Pellicciotti F., Bauder A., Parola M.* Effect of glaciers on streamflow trends in the Swiss Alps // *Water Resour Res.* 2010. Vol. 46. No. 10. P. W10522.
 108. *Penna D. van Meerveld H.J.* Spatial variability in the isotopic composition of water in small catchments and its effect on hydrograph separation // *WIREs Water*. 2019. Vol. 6. P. 1367.
 109. *Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A., Chernomorets S.S., Evans S.G., Kidyaeva V.M., Krylenko I.N., Norin S.V., Shakhmina M.S., Seynova I.B.* Monitoring of Bashkara Glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst // *Nat. Hazards*. 2012. Vol. 61. P. 1293–1316.
 110. *Pettitt A. N.* A non-parametric approach to the change-point problem // *J Royal Stat Soc.* 1979. Vol. 28. No. 2. P. 126–135.
 111. *Popovnin V. V., Rozova A.* Influence of sub-debris thawing on ablation and runoff of the Djankuat Glacier in the Caucasus // *Nord. Hydrol.* 2002. Vol. 33. P. 75–94.

112. *Popovnin V., Rezepkin A., Tielidze L.* Superficial moraine expansion on the Djankuat glacier snout over the direct glaciological monitoring period // *Earth Cryosphere*. 2015. Vol. 19. P. 79–87.
113. *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. P. 1256696.
114. *Rafiq M., Mishra A.* Investigating changes in Himalayan glacier in warming environment: A case study of Kolahoi glacier // *Environmental Earth Sciences*. 2016. Vol. 75. P. 1–9.
115. *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. Vol. 27. No. 2. P. 323–339.
116. *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. Vol. 27. P. 323–339.
117. *Raper S.C.B., Braithwaite R.J.* Glacier volume response time and its links to climate and topography based on a conceptual model of glacier hypsometry // *The Cryosphere*. 2009. Vol. 3. No. 2. P. 183.
118. *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.* Djankuat glacier station in the North Caucasus, Russia: a database of glaciological, hydrological, and meteorological observations and stable isotope sampling results during 2007–2017 // *Earth System Science Data*. 2019. V. 11. No. 3. P.1463–1481.
119. *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. Vol. 340. P. 126–134.
120. *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. Vol. 163. No. 4. P. 2135–2151.
121. *Rets E.P., Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Frolova N.L., Durmanov I.N., Telegina A.A., Telegina E.A., Grigoriev V.Y.* Recent trends of river runoff in the North Caucasus // *Geography, environment, sustainability*. 2018. Vol. 11. No. 3. P. 61–70.

122. RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory (RGI) – A dataset of global glacier outlines: Version 6.0. Technical Report. Global Land Ice Measurements from Space, Boulder, Colorado, USA. 2017. (дата обращения: 20.10.2021)
123. *Rounce D.R., Hock R., McNabb R.W., Millan R., Sommer C., Braun M.H., Malz P., Maussion F., Mouginot J., Seehaus T.C., Shean D.E.* Distributed global debris thickness estimates reveal debris significantly impacts glacier mass balance // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48. P. 1–23.
124. *Sakai A., Fujita K.* Contrasting glacier responses to recent climate change in High-Mountain Asia // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. P. 13717.
125. *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 // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. No. 6. P. 7337–7356.
126. *Schaffhauser T., Chiogna G., Disse M., Hofmeister F.* SWAT-G, a New Glacier Routine for the Hydrological Model SWAT // *AGU Fall Meeting Abstracts*. 2022. P. H22O-1016.
127. *Schulla J.* Model Description WaSiM-ETH. Hydrology Software Consulting. 2007. Zürich.
128. *Seibert J., Vis M.J.P., Kohn I., Weiler M., Stahl K.* Representing glacier geometry changes in a semi-distributed hydrological model // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 22. No. 4. P. 2211–2224.
129. *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.
130. *Shahgedanova M., Nosenko G., Kutuzov S., Rototaeva O., Khromova T.* Deglaciation of the Caucasus Mountains, Russia/Georgia, in the 21st century observed with ASTER satellite imagery and aerial photography // *The Cryosphere*. 2014. Vol. 8. No. 6. P. 2367–2379.
131. *Shannon S., Smith R., Wiltshire A., Payne T., Huss M., Betts R., Caesar J., Koutroulis A., Jones D., Harrison S.* Global glacier volume projections under high-end climate change scenarios // *The Cryosphere*. 2019. Vol. 13. P. 325–350.
132. *Singh V., Jain S. K., Shukla S. K.* Glacier change and glacier runoff variation in the Himalayan Baspa River basin // *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 593. P. 125918.
133. *Stokes C.R., Gurney S.D., Shahgedanova M., Popovnin V.* Late-20th-century changes in glacier extent in the Caucasus Mountains, Russia/Georgia // *Journal of Glaciology*. 2006. Vol. 52. P. 99–109.
134. *Strasser U., Corripio J., Pellicciotti F., Burlando P., Brock B., Funk M.* Spatial and temporal variability of meteorological variables at Haut Glacier d’Arolla (Switzerland)

- during the ablation season 2001: Measurements and simulations // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2004. Vol. 109. No. 3. P. 1–18.
135. *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. Vol. 7. No. 11.
 136. *Taylor K., Ronald S., Meehl G.* An overview of CMIP5 and the experiment design // *Bull. Am. Meteor.* 2011. Vol. 93. No. 4. P. 485–498.
 137. *Thornton J.M., Mariethoz G., Brauchli T.J., Brunner P.* Efficient multi-objective calibration and uncertainty analysis of distributed snow simulations in rugged alpine terrain // *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 598. P. 126241.
 138. *Tielidze L.G., Bolch T., Wheate R.D., Kutuzov S.S., Lavrentiev I.I., Zemp M.* Supra-glacial debris cover changes in the greater caucasus from 1986 to 2014 // *The Cryosphere*. 2020. Vol. 14. P. 585–598.
 139. *Tielidze L.G., Wheate R.D.* The greater caucasus glacier inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan) // *The Cryosphere*. 2018. Vol. 12. No. 1. P. 81–94.
 140. *Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M.* Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st century // *International Journal of Climatology*. 2019. Vol. 39. No. 12. P. 4703–4720.
 141. *Vacco D. A., Alley R. B., Pollard D.* Glacier advance and stagnation caused by rock avalanches // *Earth Planet. Sc. Lett.* 2008. Vol. 294. P. 123–130.
 142. *Verbunt M., Gurtz J., Jasper K., Lang H., Warmerdam P., Zappa M.* The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling // *Journal of hydrology*. 2003. Vol. 282. No. 1–4. P. 36–55.
 143. *Verhaegen Y., Huybrechts P., Rybak O., Popovnin V.* Modelling the evolution of Djankuat glacier, North Caucasus, from 1752 until 2100 AD. // *The Cryosphere*. 2020. Vol. 14. No. 12. P. 4039–4061.
 144. *Vionnet V., Brun E., Morin S., Boone A., Faroux S., Le Moigne P., Martin E., Willemet J.-M.* The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7.2 // *Geoscientific model development*. 2012. Vol. 5. No. 3. P. 773–791.
 145. *Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M., Hassan M.A., Lowe A.* Numerical modelling of glacial lake outburst floods using physically based dam-breach models // *Earth Surf. Dyn.* 2015. Vol. 3. P. 171–199.
 146. *WGMS (2024): Fluctuations of Glaciers Database. World Glacier Monitoring Service (WGMS). Zurich, Switzerland.*

147. *Zekollari H., Huss M., Farinotti D.* Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps 155 under the EURO-CORDEX RCM ensemble // *The Cryosphere*. 2019. Vol. 13. P. 1125–1146.
148. *Zemp M., Nussbaumer S. U., Gärtner-Roer I., Bannwart J., Paul F., Hoelzle M.* WGMS (2021): Global Glacier Change Bulletin No. 4 (2018–2019). World Glacier Monitoring Service. Zurich, Switzerland, 2021. 278 pp.