

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ
РЕСПУБЛИКИ**

**Институт водных проблем и гидроэнергетики
БИШКЕКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ им.К.КАРАСАЕВА**

**Центрально-Азиатский институт прикладных
исследований Земли**

На правах рукописи
УДК 556.06 (575.2) (043.3)

КАЛАШНИКОВА ОЛЬГА ЮРЬЕВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА
ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА РЕК НАРЫНСКОГО БАССЕЙНА И ИХ
ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ**

25.00.27- Гидрология суши, водные ресурсы и гидрохимия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
Кандидат географических наук, доцент
Аламанов С.К.

Бишкек – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ..... | 5 |
| ВВЕДЕНИЕ..... | 6 |
| ГЛАВА 1. КРАТКИЙ ОБЗОР И АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ | 12 |
| Краткие выводы по главе 1..... | 25 |
| ГЛАВА 2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ..... | 27 |
| 2.1. Объект исследования. Бассейн реки Нарын..... | 27 |
| 2.2. Физико-географические условия бассейна реки Нарын..... | 32 |
| 2.2.1. Геологическое строение, орография и рельеф поверхности..... | 32 |
| 2.2.2. Климатические особенности бассейна реки Нарын..... | 38 |
| 2.2.3. Почвенный покров и растительность..... | 43 |
| 2.2.4. Гидрография..... | 48 |
| 2.2.5. Современное оледенение бассейна реки Нарын в условиях глобального потепления..... | 51 |
| 2.3. Методы исследования..... | 54 |
| 2.3.1. Методика оценки влияния климатических параметров на сток реки Нарын и его компоненты..... | 54 |
| 2.3.2. Основные теоретические подходы для разработки методик долгосрочного прогнозирования стока горных рек..... | 55 |
| 2.3.3. Методика удаления облачности со спутниковых изображений для определения площади снежного покрова на территории бассейна реки..... | 63 |
| 2.3.4. Прогноз стока рек с использованием спутниковых снимков..... | 68 |
| 2.3.5. Оценка эффективности методики и оправданности прогнозов..... | 72 |
| 2.3.6. Статистическое моделирование в R-program..... | 74 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.3.7. Методика прогноза гидрологической засухи..... | 78 |
| Краткие выводы по главе 2..... | 80 |
| ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА СТОК РЕКИ НАРЫН И ЕЕ ПРИТОКОВ..... | 82 |
| 3.1. Влияние метеопараметров на изменение стока рек Нарынского бассейна..... | 82 |
| 3.2. Повышение суммы осадков за холодный период..... | 86 |
| 3.3. Изменение температуры воздуха за сезоны..... | 88 |
| 3.4. Увеличение продолжительности теплого периода..... | 90 |
| 3.5. Изменение водного режима и внутригодового распределения стока реки Нарын..... | 91 |
| 3.6. Исследование основных компонентов стока реки Нарын..... | 93 |
| 3.7. Влияние на сток реки продолжительности залегания и максимальной высоты снежного покрова..... | 103 |
| Краткое заключение по главе 3..... | 106 |
| ГЛАВА 4. ИННОВАЦИОННАЯ МЕТОДИКА ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА СТОКА РЕК НАРЫНСКОГО БАССЕЙНА И ПРИТОКА ВОДЫ В ТОКТОГУЛЬСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ..... | 108 |
| 4.1. Прогноз стока на основе данных о продолжительности и максимальной высоте снежного покрова по данным постоянных рек наземной сети наблюдений..... | 108 |
| 4.2. Прогноз стока на основе данных о площади снежного покрова по данным спутниковых снимков MODIS, в том числе для рек с отсутствием наблюдений..... | 110 |
| 4.3. Прогноз стока с использованием статистических моделей в R- program..... | 122 |
| 4.4. Прогноз гидрологической засухи на зимне-весенний период..... | 126 |
| 4.5. Прогноз стока рек Нарынского бассейна и притока воды в Токтогульское водохранилище на месяцы вегетации..... | 129 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Краткие выводы по главе 3..... | 137 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 139 |
| ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ..... | 141 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ..... | 143 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ. Акт о внедрении методики в отдел гидропрогнозов Кыргызгидромета. | |

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

CAWa – Central Asia Water

ЦАВА – Вода в Центральной Азии

ЦАИИЗ – Центрально-Азиатский Институт Прикладных Исследований Земли

GFZ – Немецкий Центр Исследования Земли

ГЭС – гидроэлектрические станции

ГО – гражданская оборона

МЧС КР – Министерство по чрезвычайным ситуациям Кыргызской Республики

МС – метеостанция

ГП – гидропост

Вдхр. – водохранилище

м³/с – метры кубические на секунду

млн.м.куб. – миллионы метров кубических

м.н.у.м. – метры над уровнем моря

°С – градусы Цельсия

мм - миллиметры

EGU2017 и EGU2019 – Генеральная Ассамблея Союза Европейских Наук о Земле

КИОВР – комплексное использование и охрана водных ресурсов

ИУВР – Интегрированное управление водными ресурсами

ЕЭК ООН – Европейская экономическая комиссия

ПБАМ – Помощь странам бассейна Аральского моря

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Водность реки Нарын и пополнение запаса воды в Токтогульском водохранилище для стран верхнего течения, таких как Кыргызстан и ближайших соседних территорий, наиболее важна для целей энергетики, а для стран нижнего течения Узбекистана, Казахстана и Таджикистана – для ирригационных целей. Одной из проблем зимнего периода, является подтопление населенных пунктов в нижнем течении реки Нарын.

Основной сток реки Нарын (70-80% годового стока) формируется в период апрель-сентябрь и обеспечивает максимальное наполнение водой Токтогульского водохранилища. Наибольшая потребность в поливной воде возникает в засушливые летние месяцы, когда осадков выпадает незначительное количество, а питание реки зависит от таяния ледников в высокогорной зоне.

Изучение компонентов стока реки Нарын является важной задачей для интегрированного и устойчивого управления водными ресурсами. Качественная и достоверная информация об ожидаемой водности реки Нарын на весенне-летний период очень важна для планирования использования водных ресурсов и вододеления между трансграничными государствами Центральной Азии.

Для решения этой задачи гидрометслужбы стран Центральной Азии используют разработанные в 1950–1980-е годы методики для составления долгосрочных прогнозов водности рек, основанные на данных наземных наблюдений о накоплении осадков за холодный период времени. Однако, сокращение сети наблюдений на 50 % и закрытие метеостанций в 1990-ые годы, привело к ухудшению оценки накопления снега в горах и, соответственно, ухудшению качества гидропрогнозов, которое не удовлетворяло обслуживаемые гидрометслужбами организации. Поэтому использование методов гидрологического прогнозирования, основанных на данных о снежном покрове спутниковых снимков, является альтернативой для восполнения этой недостающей инфор-

мации, а также решением вопросов улучшения качества и достоверности прогнозов.

Связь работы с научными программами и темами. Диссертационные исследования проведены в соответствии с проектом CAWa (Central Asian Water) с 2008 по 2019 годы по реализации компонента «Гидрологическое прогнозирование и моделирование стока рек Кыргызстана».

Исследования включали разработку прогностических методик с использованием спутниковой информации и статистического моделирования и внедрение результатов в систему оперативного гидрологического прогнозирования Кыргызгидромета.

Цель и задачи исследования. Основной целью исследования являлось изучение влияния климатических изменений на сток реки Нарын и разработка эффективных методов долгосрочного гидрологического прогнозирования, в том числе на основе данных спутникового зондирования.

В связи с этим в исследовании были поставлены следующие задачи:

1. Анализ влияния климатических факторов на сток реки Нарын;
2. Исследование изменения компонентов стока в условиях глобального потепления и сокращения оледенения;
3. Применение наземных данных о высоте снежного покрова и переходе суточной температуры воздуха через 0 °С в сторону положительных температур для гидрологического прогнозирования.
4. Применение спутниковой информации для долгосрочного прогноза стока реки Нарын и основных ее притоков на период вегетации и его месяцы для интегрированного управления водными ресурсами и предупреждения опасных гидрологических явлений (гидрологических засух и наводнений).

Научная новизна работы. Разработанные автором диссертации методы долгосрочного гидрологического прогнозирования на основе данных снимков MODIS, данных наземных наблюдений о высоте и продолжительности залегания снежного покрова, а также использования моделирования в R-program, мо-

дели гидрологической засухи являются **инновационными** и ранее в Кыргызстане не применялись.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования:

1. Методика была внедрена в систему оперативного гидрологического прогнозирования Кыргызгидромета в марте 2015г. В период с 2015 по 2019 годы методика успешно прошла апробацию и принята к работе, что позволяет Кыргызгидромету проводить качественное гидрологическое обеспечение на научной основе и на современном мировом уровне.
2. Результаты расчетов по составленным автором методикам направляются в правительственные организации, Министерство энергетики КР, ОАО «Электрические станции», Департамент водного хозяйства и областные водные хозяйства, что позволяет им эффективно решать вопросы планирования водных ресурсов как между трансграничными республиками, так и внутри республики, между водохозяйственными объектами, а также решать вопросы разработки режима каскада ГЭС на реке Нарын.
3. Решаются вопросы своевременности и эффективности обслуживания и гидрометобеспечения как местных потребителей гидрологической продукции, так и соседних национальных гидрометслужб.

Экономическая значимость результатов диссертационного исследования:

1. Обеспечение и содержание наземной сети наблюдений Кыргызгидромета требует больших финансовых затрат, поэтому необходимо использование альтернативных источников информации, таких как находящиеся в бесплатном и свободном доступе в интернете спутниковые снимки MODIS, примененные в разработанных автором методиках.
2. Сбор информации о накоплении осадков в горах республики занимает достаточно много финансовых затрат на ее доставку в Управление связи Кыргызгидромета, т.к. многие пункты наблюдений находятся в

трудноступных горных районах на значительном расстоянии от услуг сотовой связи и доступа к интернету. В отличие от спутниковой информации, которая поступает в Кыргызгидромет по интернету ежедневно и по всей территории республики.

3. Значительный ущерб населенным пунктам, сельхозугодьям, дорогам, каналам и т.д. приносят опасные гидрологические явления. Разработанная соискателем эффективная методика позволяет заблаговременно предупреждать об ожидаемом многоводье или маловодье соответствующие организации (МЧС КР, водохозяйственные и гидротехнические компании) для своевременного принятия ими превентивных мер по уменьшению степени воздействия и последствий негативных экологических явлений.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Влияние на изменение стока реки Нарын основных климатических факторов (площади, продолжительности и максимальной высоты снежного покрова, даты перехода температуры воздуха через 0 °С, осадков за холодный период и температуры воздуха за осенний и весенний периоды).
2. Вклад талого снегового и ледникового, а также грунтового питания в сток реки Нарын в современный период.
3. Применение данных наземных наблюдений за максимальной высотой и продолжительностью снежного покрова для долгосрочного прогноза водности.
4. Применение информации о снежном покрове спутниковых снимков MODIS, статистического анализа в R-program и модели гидрологической засухи для разработки инновационных методов долгосрочного гидрологического прогнозирования и рационального водопользования.

Личный вклад соискателя.

Соискателем самостоятельно решены следующие задачи:

- проведение анализа климатических факторов, и их влияния на средний многолетний и средний за вегетационный период сток реки Нарын на его внутригодовое изменение и изменение в его компонентах за весь имеющийся ряд наблюдений со дня открытия метеостанций и гидропостов по 2018 год;

- определение качественного и количественного состава предикторов для составления надежных, своевременных и эффективных прогнозов водности рек Нарынского бассейна;

- разработка методики прогноза водности рек Нарынского бассейна на вегетационный период и его месяцы на основе данных наземных наблюдений (о высоте и продолжительности снежного покрова);

- разработка методики долгосрочного гидрологического прогнозирования на реках Нарынского бассейна на основе данных снежного покрова спутниковых снимков MODIS;

- использование статистической модели GFZ, разработанной в R-program и модели гидрологической засухи для прогнозирования водности реки Нарын;

- внедрение перечисленных методик в систему оперативного гидрологического прогнозирования Кыргызгидромета, проведение обучающего тренинга по их использованию, оказание методической помощи в освоении методик в период апробации с 2015 по 2019 годы.

Апробация результатов исследований. Основные результаты работы докладывались на научных конференциях и симпозиумах:

- «Горные угрозы - 2013» (с. Бостери, Кыргызстан 2013 г.);

- «Дистационные и наземные исследования Земли в Центральной Азии» (Бишкек, Кыргызстан, 2014 г.);

- Симпозиуме по Гляциологии в Высокогорной Азии, в (г.Катманду, Непал, 2015 г.);

- тренинге по применению методики прогноза стока рек Нарынского бассейна на основе снимков MODIS в оперативной практике Кыргызгидромета (2015 г.);

- 16-ом Гляциологическом Симпозиуме (г.Петербург, Россия, 2016 г.);

- Международном Семинаре, организованном проектом САВа (г.Ташкент, Узбекистан, 2106 г.);
- Международном семинаре и рабочей встрече по проекту САВа (г.Алматы, 2016 г.);
- 14-ой Всероссийской ежегодной открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов)» (РАН, г. Москва, 2016 г.);
- «Snow Hydrology» (г. Гейдельберг, Германия, 2018 г.);
- 17-ой Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (ИКИ РАН, г. Москва, Россия 2019 г.);
- «Snow Hydrology» (г. Болзано, Италия, 2020 г.).

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. По теме диссертации была опубликована 23 статьи из них: 3 входят в базу Скопус, 16 входят в базу РИНЦ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит 4 главы, введение, выводы, практические рекомендации и приложения. Объем работы 157 страниц, включая 26 таблиц, 43 рисунка, 1 приложение и список использованных источников из 134 наименований.

Благодарности. Автор выражает признательность координаторам проекта САВа А.А. Гафурову и К. Унгер-Шаесте, а также специалистам Кыргызгидромета Э.А. Оморовой и Ж.К. Абдыкеримовой за помощь в реализации Соглашения по проекту. Также автор выражает благодарность к.г.н., доценту С.К. Аламанову и секретарю гидрологического совета, к.ф.-м.н. Т.В. Тузовой за помощь в подготовке материала диссертации.

ГЛАВА 1. КРАТКИЙ ОБЗОР И АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В процессе работы над диссертацией использовались монографии с описанием физико-географических условий и современного климата Нарынского бассейна; монографии и статьи о водности рек Средней Азии; руководства, учебные пособия, наставления по составлению долгосрочных гидрологических прогнозов; статьи и руководства по использованию спутниковых изображений в гидрологическом прогнозировании; статьи по изменению климата, оледенения и ледникового стока рек Центральной Азии (Средней Азии).

Особенности физико-географических условий Нарынского бассейна были изучены по монографии В.А. Благообразова, Л.Г. Бондарева и др. под руководством к.г.н. Р.Д. Забирова, «Бассейн реки Нарын. Физико-географическая характеристика». В ней отражено все многообразие орографии, климатические и гидрологические особенности бассейна [1].

Годовой сток, водный режим и питание реки Нарын и ее притоков был изучен по работам В.Л. Шульца, О.П. Щегловой и монографии «Ресурсы поверхностных вод, бассейн р.Сыр-Дарьи» [2-4]. В этих работах подчеркивается решающая роль в образовании стока реки Нарын сезонного снежного покрова и грунтовых вод, что, несомненно, учитывалось в исследовательской работе соискателя.

Современная оценка водных ресурсов на 2000 год в связи с тенденциями изменения климата изучалась по фундаментальной монографии «Водные ресурсы Кыргызстана на современном этапе» авторов Д.М. Маматканова, Л.В. Бажановой, В.В. Романовского [5].

Соискатель придерживался классификации рек по типам питания и гидрологического районирования рек Средней Азии с принципами, разработанными В.Л. Шульцем [6, 7]. Где определения типа питания рассчитывалось (δ) отношение стока за период летнего половодья (июль-сентябрь), сформировавшие-

гося за счет талых вод высокогорных снегов и ледников к периоду весеннего половодья (март-июнь), сформировавшегося за счет таяния сезонного снега.

Схожая классификация также была принята М.Н. Большаковым, который выделял три фазово-однородных периода в годовом стоке рек по генетическим признакам [8]: период снегового половодья, формируемого преимущественно талыми водами сезонных снегов нижних и средних ярусов гор (талые воды А); период снегово-ледникового половодья, сформированного талыми водами высокогорных снегов, снежников и ледников (талые воды Б) и период межени, когда речной сток питается в основном водами, аккумулированными поверхностью водосборов, подземными водами в первую очередь. В районировании Тянь-Шаня он выделил отдельно Нарынский район, куда включил весь бассейн реки Нарын (исключение Кара-Суу (правая)), где определяющими факторами, влияющими на сток реки, были определены орография бассейна, распределяющая климатические характеристики.

В диссертационной работе были представлены результаты расчетов изменения в компонентах стока (талого снегового, талого ледникового и грунтового питания) реки Нарын за современный период, рассчитанных с использованием метода генетического (вертикального) расчленения гидрографа. В основе этого исследования был принят метод вертикального расчленения гидрографа рек для оценки компонентов стока, одним из основоположников которого был М.И. Львович [9].

Более подробный анализ источников питания рек Средней Азии был изучен по работе О.П. Щегловой, которая разработала универсальные методы расчета компонентов стока горных рек Средней Азии [2]. Эти методы были успешно применены и разрабатывались с учётом особенностей исследуемых объектов, для рек Центральной Азии и, в частности, Кыргызстана, исследователями А.О. Кеммерихом, А.Н. Диких, С.К. Аламановым, А.А. Эргешевым и Л.В. Бажановой. Так, А.О. Кеммерих исследовал ледниковый сток как в течение года, так и в период абляции, рассчитал модуль ледникового стока рек Средней Азии [10]. А.Н. Диких использовал метод расчленения гидрографа для расчета

водного баланса рек Иссык-Кульского бассейна [11]. С.К. Аламанов выполнил оценку источников питания рек Северо-запада Кыргызстана, результаты которой использованы при разработке долгосрочных прогнозов стока за вегетационный период [12]. А.А. Эргешев в 1980-ых годах занимался расчетами поверхностного и подземного стока, и составил водный баланс рек Кыргызстана [13]. Л.В. Бажанова успешно использовала метод расчленения гидрографа для расчета талой снеговой и ледниковой составляющей, а также для расчета дождевого питания на реке Кашка-Тор для периода наблюдений 2013 – 2017 годы [14, 15].

Некоторые исследователи занимались в основном изучением отдельно ледникового стока рек Средней Азии. Так, В.Г. Коноваловым, в 1985 году были проведены расчеты ледникового стока на основе физико-статистической модели процесса таяния и формирования стока, которые им были обновлены в 2015 году с учетом климатических изменений, в том числе и для бассейна реки Нарын [16-18]. А.Н. Диких использовал в расчетах ледникового стока методы, основанные на выявленных зависимостях таяния ледников от температуры воздуха, используя также данные об осадках на различных высотных зонах и о высоте фирновой линии. Используя полученную величину таяния льда, и затем, принимая, что абляция на уровне фирновой линии равна нулю, он составил сценарии изменения ледникового стока рек с учетом существующей тенденции потепления климата и распределения количества осадков для р.Нарын [19-21].

Данные предыдущих исследований были использованы соискателем для сравнительных оценок результатов диссертационной работы.

По мнению В.Б. Айзена, анализ влияния климатических факторов на гидрологические процессы должен включать оценку долгосрочных изменений компонентов водного баланса горных водоразделов: (испарение, речной сток, тип и количество осадков, источники снега), температуры воздуха, количества облачности, интенсивности солнечной радиации, массы ледников, включая количество осадков, накопленных на ледниках, атмосферного давления, атмосферной циркуляции, уровней закрытых озер, химического анализа проб реч-

ной и озерной воды [22]. К сожалению, многие перечисленные параметры в Нарынском бассейне либо не измеряются, либо Кыргызгидромет не предоставляет доступа к архивам для проведения такого полного исследования. В данной работе соискателем было учтено влияние на сток только основных климатических параметров: температуры воздуха, переход температуры воздуха через 0 °С, продолжительности теплого периода, количества осадков, изменение площади оледенения, высоты и количества дней со снежным покровом по данным наземных наблюдений с 1940 года по настоящее время [23-25] и спутниковых наблюдений с 2000 года по настоящее время.

Основная часть диссертационной работы посвящена разработке методов долгосрочного прогнозирования стока реки Нарын с использованием инновационных подходов. Для этого соискателем был изучен опыт разработки методов прогноза водности горных рек Центральной Азии предыдущих исследователей.

Методология гидрологического прогнозирования на реках Центральной Азии была разработана исследователями З.В. Джорджио и Т.С. Абальян. З.В. Джорджио занимался вопросами расчета основных источников питания рек Средней Азии, в том числе расчетом грунтового питания реки Нарын в створе с.Уч-Курган, кроме того, он внес вклад в разработку статистических методов прогноза стока горных рек [26, 27]. При разработке методик прогноза водности рек на вегетационный период З.В. Джорджио использовал данные маршрутных снегомерных съемок [28]. Значительный вклад в разработку методов прогноза стока рек Средней Азии и реки Нарын внесла Т.С. Абальян. В основе методов прогноза стока реки Нарын на вегетационный период основным фактором, по её мнению, являлось накопление осадков за холодный период, несмотря на то, что осадки теплого периода в этом бассейне превышают осадки холодного периода [29]. Осадки, выпадающие в теплый период, учитывались ею дополнительно при разработке методик на кварталы. При разработке прогнозов на месяцы вегетации Т.С. Абальян учитывала стоковую возможность реки, т.е. отношение предшествующего расхода воды к предшествующим температурным

условиям [29, 30]. Последующие исследовательские работы были направлены на количественный и качественный состав предикторов для составления линейных уравнений. Исходя из этого анализа, исследователи Л.Н. Боровикова, А.Г. Гриневич и др. предложили линейные статистические модели для прогноза стока некоторых рек Средней Азии на период вегетации и его месяцы [31].

Методы, применяемые в настоящее время в системе оперативного гидрологического прогнозирования национальных гидрометслужб, основаны на опыте этих исследований.

Соискателем были изучены методы, принятые в практике оперативного гидрологического прогнозирования Кыргызгидромета, разработанные Т.С. Абальян для прогноза стока рек Чуйской долины, Е.И. Гирник для рек Ферганской долины и Л.В. Бажановой для рек Нарынского бассейна [32-34]. В большинстве линейных уравнений для долгосрочного гидрологического прогнозирования ими используются данные о накоплении осадков за холодный период и предшествующем стоке реки. Данные маршрутных снегосъемок пригодны и используются лишь для некоторых рек Кыргызстана. Эффективность методов, основанных на данных маршрутных снегосъемок для долгосрочного прогнозирования рек Северо-Запада Кыргызстана (Чуйского и Таласского бассейнов) была оценена Аламановым С.К., который отметил отсутствие их репрезентативности и не пригодность для использования в практике гидрологических прогнозов [12]. Л.В. Бажановой была разработана методика прогноза притока воды в Токтогульское водохранилище на вегетационный период и его месяцы. В ее методике предложены линейные зависимости стока реки Нарын с данными метеостанций о накоплении осадков за холодный период и предшествующем стоке реки Нарын. В работе также представлен анализ влияния температурных аномалий на сток реки Нарын в апреле и мае [34]. Последующие разработки методик долгосрочных гидрологических прогнозов, в том числе и для реки Нарын, с применением компьютера были также основаны на расчете линейных зависимостей стока и осадков за холодный период (октябрь-март, октябрь-апрель), предшествующего меженного стока. [35, 36].

Была изучена также учебная литература по учебникам по гидрологическому прогнозированию для университетов и гидрометеорологических институтов (Б.А. Аполлова) и для гидрометеорологических техникумов (Е.Г. Попова), изданных в 1970-ых годах. В соответствии с работами Б.А. Аполлова, главным аргументом для составления долгосрочных прогнозов является накопление осадков за холодный период, он подчеркивает также зависимость средневегетационного стока от зимних температур [37 с.277]. Е.Г. Попов в методике прогноза стока горных рек на вегетационный период приводит два предиктора определяющие накопление снега – накопления осадков за холодный период (октябрь - март) в виде относительной величины их отклонения от нормы и средний слой воды по данным снегомерных съемок на конец марта [38, с 191-192]. Большая исследовательская работа по процессу накоплению снежного покрова была проведена Подрезовым О.А. [39-41]. Подрезовым О.А. были рассчитаны формулы высотных зависимостей средних годовых максимальных запасов воды в снежном покрове для склонов хребтов различных климатических областей Кыргызстана [42], которые можно использовать в прогностических моделях для экстраполяции максимальных запасов воды в снеге.

Соискатель изучил также опыт исследователей, использующих математическое моделирование для расчета гидрографа стока с 1970-ых годов. Математическое моделирование позволило перейти от использования косвенных характеристик стокообразующих факторов, применяемых в физико-статистических методах, к приближенным расчетам этих факторов. Запасы воды в снежном покрове, его распределение по высоте, другие факторы, влияющие на формирование стока горных рек, стали определяться математическими выражениями. Первые модели, использующих линейные расчеты температуры воздуха, осадков и гипсографическую кривую, аппроксимированную уравнением параболы для горных рек Кавказа, разработал Важнов А.Н. [43].

Соискатель проходил стажировки и тренинги по гидрологическому прогнозированию и математическому моделированию в Среднеазиатском научно-исследовательском институте (САНИИ) и Казахском научно-

исследовательском институте при Казгидромете. Применение ЭВМ для математического моделирования значительно упростило задачу расчета стока горных рек. Для моделирования стока горных рек Средней Азии используют методы, разработанные исследователями В.М. Мухиным, Л.Н. Боровиковой, Р.М. Денисовым и И.Д. Шенцисом. И.Д. Шенцис в своих методах использовал расчет трансформации стока для горного водосбора как две емкости с разной регулирующей способностью. В результате расчетов им было выяснено, что подземный сток (или сильно регулируемый) сток для рек с высокогорными водосборами, например, Кара-Дарья и Варзоб составил 50%, а время добегания стока реки во вторую емкость (поверхностный сток) составляет месяц и более, что связано с более поздним таянием снега в высокогорье по сравнению с предгорьями [44]. Наиболее разработан в математическом моделировании бассейн реки Кара-Дарья. Описанием уравнений для вычисления суточных осадков и температурного градиента на различной высоте для склонов Ферганского и Алайского хребтов занимался В.М. Мухин, фазовым состоянием осадков и таянием снежного покрова – Г.Е. Глазырин [45, 46]. При разработке математических моделей учитывался опыт предыдущих исследований, проводимых Т.С. Абальян и Л.Н. Боровиковой, а интегралы для расчета трансформации стока использовались из работ Р.М. Денисова [47].

Тренинги проводились исследователями, короткие провели итоговую исследовательскую работу по математическому моделированию процесса стока горных рек Л.Н. Боровиковой и Ю.М. Денисовым. В их разработках исследования были проведены для рек Пскем и Ахангаран, для которых было дано описание расчета поступления осадков на поверхность водосбора, моделей формирования снежного покрова, поступления талой и дождевой воды. В их работе использованы линейные и нелинейные математические модели трансформации стока, получены хорошие результаты по использованию нелинейной двухобъемной модели. Однако исследователями был сделан вывод о невозможности использования нелинейной двухобъемной модели как прогностической, что связано с отсутствием достоверного прогноза суточных сумм осадков и средне-

суточных температур воздуха 48, с.124-125]. Математическое моделирование стока горных рек Центральной Азии использовалось, таким образом, для краткосрочного гидрологического прогнозирования на период заблаговременности 1-5 дней, т.е. на тот период, на который мог быть составлен прогноз метеорологических параметров. Исследователи подчеркнули, что можно использовать расчет характеристик запасов снега к прогнозам стока за вегетационный период и максимального расхода воды за половодье. Этот расчет и разработанная нелинейная двухобъемная модель трансформации стока были положены в основу исследовательской работы по созданию автоматической информационной системы гидрологического прогнозирования (АИСГП) в 2000-ых годах. Соискателем были пройдены тренинги по использованию модели АИСГП, разработанной Ю.М. Денисовым, Н.А. Агальцевой и А.В. Паком для расчетов запасов снега и прогноза водности рек Центральной Азии на вегетационный период с использованием компьютера [49]. Недостатком работы было отсутствие реальной информации о современной площади оледенения в бассейнах рек, т.к. для расчетов использовались данные Каталога ледников СССР, изданного в 1980-ых годах. Сокращение площади оледенения, которое отмечается в последние десятилетия, приводит к ошибкам в прогнозах расходов воды на реках, где ледниковый сток играет существенную роль.

В основу разработки методов долгосрочного гидрологического моделирования соискателем было положено руководство по гидрологическим прогнозам, которое было издано в 1989г. и стало основным документом при разработке методик для рек Центральной Азии, применяемых в системе национальных гидрометслужб [50]. Кроме этого основного документа было использовано руководство по гидрологической практике ВМО (Всемирной Метеорологической Организации), куда входят различные инновационные и эффективные методы гидрологического прогнозирования. Руководство ВМО постоянно обновляется, последнее издание было опубликовано в 2012 году [51].

Соискателем кроме методов, основанных на данных наземных наблюдений была изучена возможность использования информации о снежном покрове

со спутниковых снимков, что особенно важно для высокогорных районов, где нет наземных наблюдений.

Были изучены исследовательские работы нескольких авторов. Впервые возможность использования спутниковой информации о снежном покрове для прогноза водности рек доказал Rango в 1977 г. [52]. Он использовал данные о площади снежного покрова за 1-20 апреля со спутниковых снимков NOAA за 1967-1972 годы и получил хорошие взаимосвязи со стоком на вегетационный период (апрель-июль) для рек Индус (территория Индии и Пакистана) и Кабул (территория Афганистана). Полученные уравнения линейной регрессии он использовал для прогноза стока рек на вегетационный период 1974 г. с ошибками 7% для реки Индус и 2% для реки Кабул в сравнении с фактическими данными.

С 1980-ых годов стали проводиться исследования по применению спутниковой информации о снежном покрове, где изучалась его динамика снежного покрова и возможность использования для гидрологического прогнозирования на вегетационный период в бассейне реки Амударья [53].

Авторы научной работы Yang et al., 2003 [54] изучали взаимосвязь динамики стока сибирских рек Обь, Енисей и Лена от изменения площади снежного покрова на их водосборах и рекомендовали использовать спутниковые снимки для практического применения в оперативном прогнозировании.

В другой работе авторов Delbart et al., 2015 [55], были использованы данные снежного покрова спутниковых снимков MODIS для прогноза стока рек на вегетационный период в высокогорном регионе Аргентины (водосборы Мендоза, Тунуян, Диаманте, Атуел). Полученные уравнения линейной регрессионной зависимости площади снежного покрова и стока за летний период для каждого водосбора имеют коэффициенты корреляции около 0.8 (R^2) и оправдываемость прогнозов водности рек 85% (15% ошибкой в сравнении с фактическими данными).

В работе авторов McGuire, et al., 2006 [56] использовались данные снежного покрова MODIS в гидрологической модели VIS, по которой был составлен прогноз сезонного стока рек с 1-марта, затем с 1-апреля и с 1-мая до конца

июля и краткосрочный (на 2 недели) прогноз стока. Лучшие результаты были получены для прогноза стока на апрель и май, когда снежный покров был наиболее значимым. Оправдываемость прогнозов стока рек на период апрель-июль составила 59%, краткосрочных прогнозов на две недели – 54%.

В другой научной работе Tahir et al., 2011 [57] выявили коэффициент корреляции 0,88 между снежным покровом со спутниковых снимков MODIS (с восьмидневным шагом) и стоком реки Хунза (притока реки Индус) на период апрель - сентябрь.

Вышеуказанные работы показывают, что существует достаточно тесная взаимосвязь между сезонным стоком и снежным покровом со спутниковых изображений, которая может использоваться для гидрологического прогнозирования, что особенно актуально для высокогорных регионов.

Впервые спутниковая информация была применена для краткосрочного гидрологического прогнозирования в бассейне реки Нарын в 2000-х годах с использованием гидрологической модели Мартинек-Ранго МТС (Модель Талого Стока или SRM - Snowmelt Runoff Model) [58]. На основе модели МТС была разработана методика краткосрочного (на 1-5 дней) прогноза притока воды в Токтогульское водохранилище [59]. Для расчетов площади и динамики снежного покрова в модели МТС использовалась информация со снимков NOAA (AVHRR). При этом основная проблема была в сложности дешифрирования информации о снежном покрове, так как облачный покров удалялся вручную в программе ERDAS. В связи с чем, снимки обрабатывались один раз в декаду, и затем информация интерполировалась на следующие девять дней, что соответственно вносило неточности в определении суточной информации о снежном покрове. Кроме того, пространственное разрешение снимка 1100 м. позволяло использовать информацию о снежном покрове только для значительных по площади бассейнов. Из-за сложности дешифрирования снимков и отсутствия методики прогноза на долгосрочный период, этот метод не был принят в практику оперативного прогнозирования Кыргызгидромета и остался лишь в проектной разработке.

Соискатель более подробно изучил возможность использования спутниковой информации со снимков MODIS (Terra и Aqua), находящихся в свободном доступе в интернете. Спутники Terra и Aqua были запущены в 2000 году и, в данном исследовании, информация о снежном покрове со снимков MODIS Terra и Aqua была использована с 2000 по 2015 гг. Для составления методик прогноза стока реки Нарын и его притоков доступна была информация о снежном покрове снимков MODIS с 2000 по 2015 гг., а для проверочных прогнозов использовались расчеты за 2017-2019 годы, что соответствовало рекомендуемому для разработки методик ряду наблюдений – 15 лет и более [60].

Соискателем были изучены исследования по реконструкции данных снежного покрова спутниковых снимков MODIS на основе снимков NOAA (AVHRR) чтобы получить более устойчивый ряд для разработки методов гидрологического прогнозирования. В работе А. Диетца и К. Конрада оценивалось состояние снежного покрова ниже границы облаков для региона Центральной Азии за период наблюдений с 1986 по 2014 годы [61]. Ими был проведен анализ продолжительности залегания снежного покрова в начале сезона, когда появлялся устойчивый снежный покров и в конце сезона, когда он разрушался. В результате была выявлена положительная динамика для сезона образования устойчивого снежного покрова для всех основных гидрологических водосборов Центральной Азии, но для сезона разрушения устойчивого снежного покрова была иная ситуация. В верхнем течении на водосборах наблюдалась отрицательная тенденция, вызванная отрицательными изменениями снежного покрова в диапазоне высот 2100 - 3500 м (и значительно отрицательными для диапазона высот 2500 - 3200 м). Поэтому представленные результаты своей работы авторы советуют интерпретировать осторожно. Основным результатом этого исследования, важным для анализа влияния снежного покрова, как климатического параметра, является вывод, что, несмотря на отсутствие отчетливой тенденции в продолжительности снежного покрова, был отмечен сдвиг в сторону более раннего появления снежного покрова и более раннего схода снежного покрова, что является доказательством изменения криосферы в Центральной Азии. Так

как этот регион в значительной степени зависит от условий формирования сезонного снежного покрова, являющегося основным источником пресной воды, то, по мнению некоторых исследователей, выявленные изменения указывают на будущие проблемы, такие как ухудшение ситуации на Аральском море, растущий спрос на гидроэлектроэнергию, обострение трансграничных водных проблем [62].

Основным преимуществом использования информации о снежном покрове спутниковых снимков MODIS Terra является разработанное в 2009 году программное обеспечение MODSNOW-Tool. В 2009 г. А.А. Гафуровым и А. Бардосси была разработана и далее усовершенствована программа MODSNOW по удалению облачного покрова, которая позволяла получать суточную информацию о снежном покрове со снимков MODIS Terra. Точность удаления облаков в программе MODSNOW-Tool составляет 94% [63], точность данных снежного покрова спутниковых снимков MODIS в сравнении с наземными данными наблюдений за высотой снега для Центральной Азии – 93% [64].

Качественный и надежный долгосрочный прогноз водности реки Нарын, основного притока реки Сырдарья, необходим для рационального использования водных ресурсов в целях Интегрированного управления водными ресурсами (ИУВР). ИУВР в странах Центральной Азии пришло на смену комплексного использования водных ресурсов в водохозяйственной отрасли Советского Союза. В 1940-60-ые годы потребность в хлопке-сырце для военной и затем текстильной промышленности, регламентировалась различными Постановлениями Правительства СССР. Развитие хлопководства в странах Центральной Азии сопровождалось строительством крупных водохранилищ для целей ирригации и водоснабжения населенных пунктов. С развитием ирригации в 1960-1990-ые годы прошлого века были созданы системы сезонного регулирования стока рек и водохранилища многолетнего регулирования на реке Сырдарья с мощными каскадами ГЭС, насосными станциями, магистральными каналами, инженерными мелиоративными системами нового освоения земель [65]. Широкомасштабное использование природных ресурсов, в том числе и водных, увеличение

орошаемых земель на основе разработанных схем комплексного использования и охраны водных ресурсов (КИОВР, 1960-70 г.г.) привело к тому, что в 1975 году водозабор в бассейне реки Сырдарья превысил располагаемый доступный поверхностный сток (36,7 км³), составив 39,4 км³. При этом предусмотренные водохозяйственные и мелиоративные технические мероприятия с улучшением техники и технологии полива, реконструкции и совершенствования ирригационных систем, не были выполнены. Все это привело в бассейне реки Сырдарья к крупнейшему экологическому кризису XX века.

После обретения независимости государства Центральной Азии приняли новое природоохранное законодательство, которое акцентировало внимание на управление прородными ресурсами [66]. ИУВР заменило КИОВР и является его продолжением, направленным на совершенствование системы управления водными ресурсами и принципов, в которых участвуют все правительственные органы стран бассейна Аральского моря, национальные и международные эксперты, региональные организации (ЕЭК ООН, программа «Помощь странам бассейна Аральского Моря (ПБАМ)» и др.). В 1998 г. было заключено соглашение об использовании водно-энергетических ресурсов бассейна Сырдарьи между Казахстаном, Кыргызстаном, Узбекистаном и Таджикистаном. С 2003 г. подписаны узкоспециализированные ежегодные двусторонние и многосторонние соглашения между Казахстаном и Кыргызстаном [67].

В условиях демографических и климатических изменений, рациональное использование водных ресурсов с адаптивным и научно-обоснованным подходом является основой развития ИУВР для эффективного и устойчивого развития Центрально-Азиатского региона [68, 69].

Итогом анализа предшествующего большого опыта многочисленных исследователей в области методологии долгосрочного гидрологического прогнозирования, стала разработанная соискателем методика прогноза водности рек Нарынского бассейна и притока воды в Токтогульское водохранилище на вегетационный период и месяцы сезонного снеготаяния на основе снимков MODIS.

Методика была внедрена в систему оперативного гидрологического прогнозирования Кыргызгидромета в марте 2015г. и прошла апробацию.

Краткие выводы по главе 1.

Анализ литературных источников, проведенный по работам предшествующих исследователей показал, что физико-географические и климатические условия, гидрография и гидрогеология Нарынского бассейна хорошо были изучены в 1960-1980-ые годы.

Оценка современного состояния водных ресурсов Кыргызстана была изучена по работам Д.М. Маматканова, Л.В. Бажановой и В.В. Романовского (2006).

Методы оценки влияния метеопараметров на сток и расчета основных компонентов стока были использованы из работ В.Л. Шульца (1965), О.П. Щегловой (1960), А.О. Кеммериха (1972), С.К. Аламанова (1977), А.А. Эргешева (1992) и Л.В. Бажановой (2017, 2018). Соискатель также ознакомился с опытом исследователей, применявших другие методы к оценке ледникового стока, как например, А.Н. Диких (1999) и В.Г. Коновалов (1985, 1993, 2015).

Методы долгосрочного гидрологического прогнозирования для рек Центральной Азии, в том числе и для Нарынского бассейна, были изучены по работам В.М. Мухина (1982), Т.С. Абальян (1956), Л.Н. Боровиковой (1972, 1977), Р.М. Денисова (1965, 2000), Н.А. Агальцевой (2000), Е.Н. Гирник (1971), Л.В. Бажановой (1979) и С.К. Аламанова (1977), а также по учебникам и руководствам по гидрологическим прогнозам.

Применение спутниковой информации в гидрологическом прогнозировании и моделировании было изучено соискателем по работам А. Rango (1977), D. Yang (2003), N. Delbart (2015), M. McGuire (2015), A. Tahir (2011) и других исследователей, которые показали целесообразность и эффективность использования спутниковой информации в гидрологическом прогнозировании и моделировании.

Разработка в 2009-2013 году А.А.Гафуровым программы MODSNOW (2009, 2016) по удалению облачного покрова со снимков MODIS, позволила использовать спутниковую информацию о снежном покрове для разработки методов долгосрочного гидрологического прогнозирования в оперативном гидрологическом прогнозировании.

Опыт использования водных ресурсов Центрально-Азиатского региона с применением принципов КИОВР и ИУВР для их рационального использования, показывает, что адаптивный и научно-обоснованный подход невозможен без учета влияния климатических изменений на сток рек. Качественный мониторинг водных ресурсов и снежного покрова необходим для эффективного планирования, прозрачной водной политики и справедливого распределения водных ресурсов в странах Центральной Азии.

В диссертационной работе соискатель использовал опыт предыдущих исследователей для разработки современных методов долгосрочного гидрологического прогнозирования главной водной артерии реки Сырдарья – реки Нарын и ее основных притоков.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Объект исследования. Бассейн реки Нарын

Бассейн реки Нарын занимает среднюю и центральную часть горного массива Тянь-Шань и протягивается с востока на запад от горного хребта Ак-Шийрак до восточной части Ферганской долины на 650 км, с севера на юг – от Киргизского хребта до хребта Торугарт – на 216 км. Бассейн ограничен квадратом градусной сетки от 71°20' до 78°18' в.д. и от 42°27' до 40°27' с.ш.

Река Нарын принадлежит к бассейну Аральского моря, являясь крупнейшим притоком реки Сырдарья, а также основной гидроэнергетической и водохозяйственной артерией республик Центральной Азии (Рис. 2.1).



Рис. 2.1. Местоположение водосбора реки Нарын в Центральной Азии в бассейне Аральского моря.

Суммарная площадь водосбора реки до слияния с рекой Карадарья составляет 59 900 км², общая протяженность реки 807 км, ресурсы поверхностных вод оцениваются в 13,7 км³/год [67, с.117]. Территория бассейна включает 1369 км² ледников [70], высотные отметки бассейна изменяются в пределах 0,7 – 5,1 км. Средняя высота бассейна по данным Шульца В.Е. 2800 [13], по расчетам, произведенным автором диссертации в ГИС – 2970 м.н.у.м.

В 1974г. на реке было построено Токтогульское водохранилище (проектный объем 19,5 млрд.м³), являющееся одним из главных водопотребителей. Ниже по течению реки расположен каскад из нескольких водохранилищ – энергетического, ирригационного и регулирующего назначения. Площадь орошае-

мых пахотных земель в кыргызской части бассейна составляет около 115 тыс. – 120 тыс. га [67, с.113-118]. Исследуемая в диссертации область – территория бассейна реки Нарын до Токтогульского каскада ГЭС с водосборной площадью около 58 000 км² [13, 25].

Анализ изменения основных метеопараметров был проведен за период с 1945 по 2015 годы по метеостанциям Кыргызгидромета, находящимся в верховье реки Нарын – Тянь-Шань и г.Нарын, на правобережных притоках реки – Ит-Агар, Тюя-Ашуу, Суусамыр и Чаек, и на левобережных притоках – Ат-Баши и Баетово [23]. В работе использованы данные о высоте и продолжительности залегания снежного покрова в бассейне реки Нарын, которые проводятся по постоянным рейкам на метеостанциях Тянь-Шань, Нарын, Ит-Агар, Чаек, Тюя-Ашуу и Суусамыр [24]. Динамика стока рек Нарынского бассейна изучалась за период наблюдений со дня открытия гидропостов и по 2019 год по данным Кыргызгидромета [25]. Расположение метеостанций и гидропостов на территории Нарынского бассейна обозначено на рисунке 2.2.

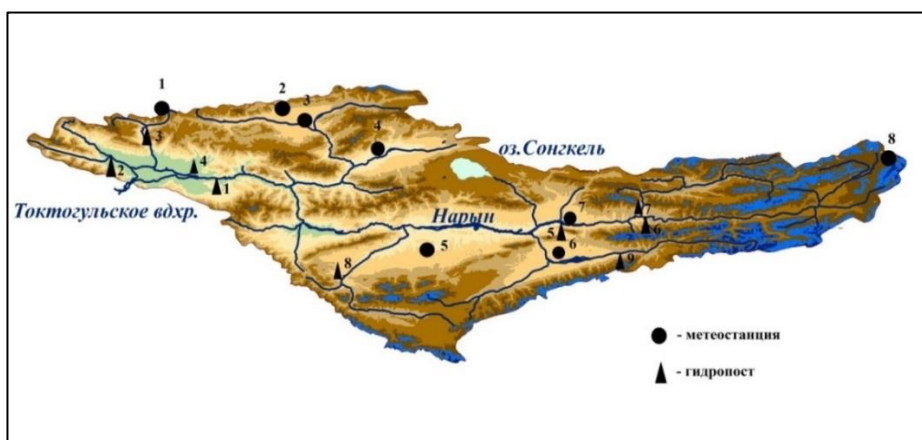


Рис. 2.2. Схема расположения метеостанций и гидропостов в Нарынском бассейне. Метеостанции и метеопосты: 1 - Ит-Агар, 2 – Тюя-Ашуу, 3 – Суусамыр, 4 – Чаек, 5 – Баетово, 6 – Ат-Баши, 7 – г.Нарын, 8 – Тянь-Шань. Гидропосты: 1 – р.Нарын – с.Уч-Терек, 2 – р.Узун-Акмат – устье р.Уста-Сай, 3 – р.Чычкан – устье р.Бала-Чычкан, 4 – р.Торкент – кишл.Торкент, 5 – р.Нарын – г.Нарын, 6 – р.Большой Нарын – устье, 7 – р.Малый Нарын – устье, р.Алабуга – кишл.Кош-Дебео, р.Ат-Башы – устье Ача-Команды.

Период наблюдений и основные характеристики метеостанций и гидропостов указаны в таблице 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1. Основные сведения о метеостанциях бассейна реки Нарын

| № п/п | Название метеостанции | Бассейн реки | Период наблюдений | Высота в м. н.у.м. |
|-------|-----------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | Ит-Агар | Чычкан | 1966-2015 | 2011 |
| 2 | Тюя-Ашуу | верховья р.Суусамыр | 1959-2015 | 3225 |
| 3 | Суусамыр | Суусамыр | 1945-2015 | 2087 |
| 4 | Чаяк | Жумгал | 1946-2015 | 1642 |
| 5 | Баетово | Терек | 1962-2015 | 1960 |
| 6 | Ат-Башы | Ат Башы | 1948-2015 | 2025 |
| 7 | г.Нарын | верховья р.Нарын | 1945-2018 | 2039 |
| 8 | Тянь-Шань | Большой Нарын | 1945-2018 | 3614 |

Таблица 2.2. Основные сведения о гидрологических постах бассейна реки Нарын.

| № п/п | Название гидропоста | Период наблюдений | Площадь водосбора до пункта наблюдений в км ² | Высота гидропоста в м.н.у.м. | Средняя высота водосбора до пункта наблюдений в м.н.у.м. |
|-------|--------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1 | р.Нарын-с.Уч-Терек | 1963-2019 | 48200 | 892 | 2890 |
| 2 | р.Узун-Акмат-устье р.Уста Сай | 1930-2019 | 1790 | 931 | 2360 |
| 3 | р.Чычкан-в 5,5 км выше устья р.Бала-Чычкан | 1940-2019 | 903 | 1013 | 2890 |
| 4 | р.Торкент-кишл.Торкент | 1966-1993 | 572 | 922 | 2420 |
| 5 | р.Нарын-г.Нарын | 1931-2019 | 10500 | 2040 | 3570 |
| 6 | р.Большой Нарын-устье | 1937-2019 | 5710 | 2257 | 3720 |
| 7 | р.Малый Нарын-устье | 1939-2019 | 3870 | 2258 | 3500 |
| 8 | р.Алабуга-кишл.Кош-Дебео | 1959-1993 | 3710 | - | 3260 |
| 9 | р.Ат-Башы-устье р.Ача-Команды | 1937-1995 | 1500 | - | - |

Река Нарын образуется от слияния двух рек Большой Нарын и Малый Нарын. Наиболее водоносные притоки реки Нарын – правобережные – Сууса-мыр и Западный Каракол, которые, сливаясь, образуют реку Кекемерен. Река Кекемерен принимает еще один крупный приток Жумгал. Самые крупные левобережные притоки реки Нарын – Ат-Башы и Алабуга, однако они по водности в три раза меньше, чем Кекемерен. Значительные притоки – реки Чычкан и Узунакмат, в пределах Кетмень-Тюбинской впадины, где в настоящее время расположено Токтогульское водохранилище.

Приток воды в Токтогульское водохранилище рассчитывался с 1950 по 1963 годы как сумма расходов воды по данным гидропостов р.Кекемерен – в 5 км. Ниже устья р.Джумгол (с.Арал) и р.Нарын – устье р.Кек-Ирим (с.Дупкур), начиная с 1963 по 2015гг. – как сумма расходов воды по данным гидропостов: река Нарын – с.Учтерек (основной створ), река Узунакмат – устье реки Уста-Сай и река Чычкан – устье р.Бала-Чычкан (боковые притоки в водохранилище).

Наиболее важный объект для анализа водности реки Нарын – гидропост Учтерек, так как он расположен в нижнем течении реки Нарын, непосредственно у впадения её в водохранилище, и характеризует общий сток большинства основных притоков реки. С 1988 года (третьей декады июня) по настоящее время в отдельные месяцы на гидропосту не проводятся измерения расходов воды во время многоводья, когда гидропост находится в подпоре от наполненного Токтогульского водохранилища, или при сложной ледовой обстановке, когда образуется ледовый зажор. Для получения информации о притоке воды в Токтогульское водохранилище и стоке на основном створе – гидропосту Учтерек была проведена реконструкция стока за 2000-2015гг. Данные о притоке воды в Токтогульское водохранилище были взяты по расчету водного баланса Токтогульского водохранилища [71]. Расчет был произведен по формуле:

$$Q_{1\text{час приток}} = Q_{1\text{час ГЭС}} \pm \Delta Q_{1\text{час}}, \text{ в } \text{м}^3/\text{с}, \quad (2.1)$$

$$\Delta Q_{1\text{час}} = \pm (\Delta V_{1\text{час}} * 1000 \text{ 000}) / 3600, \text{ в } \text{м}^3/\text{с}, \quad (2.2)$$

$$\Delta V_{1\text{час}} = \pm (V_{\text{кон.}} - V_{\text{нач.}}), \text{ млн.м}^3 \quad (2.3)$$

где, $Q_{1\text{час приток}}$ – приток воды за 1 час расчетного времени;

$\Delta Q_{1\text{час}}$ – расход воды, накопленной или сработанной в (из) водохранилища за расчетный час, $\text{м}^3/\text{с}$;

$\Delta V_{1\text{час}}$ – объем накопленной (+) или сработанной (-) воды в водохранилище за час в млн.м^3 ;

$V_{\text{нач}}, V_{\text{кон}}$ – объемы воды в водохранилище в начале и конце расчетного часа.

Расходы воды на гидропосту Учтерек были восстановлены после вычитания боковой приточности из общего притока воды в Токтогульское водохранилище.

Основным источником поступления воды в реку Нарын является талая вода от сезонного снега и грунтовые воды [2, 3]. Питание реки за счет дождевого стока составляет около 4%, талого ледникового – 5,6–10%, для верховьев реки Нарын – 23,2% от годового речного стока [2, 17].

Половодье на притоках реки Нарын начинается в середине апреля, с максимальными расходами воды в июне-июле. Основной сток реки наблюдается в апреле-сентябре, составляя 70-80% от годового стока (Рис.2.3).

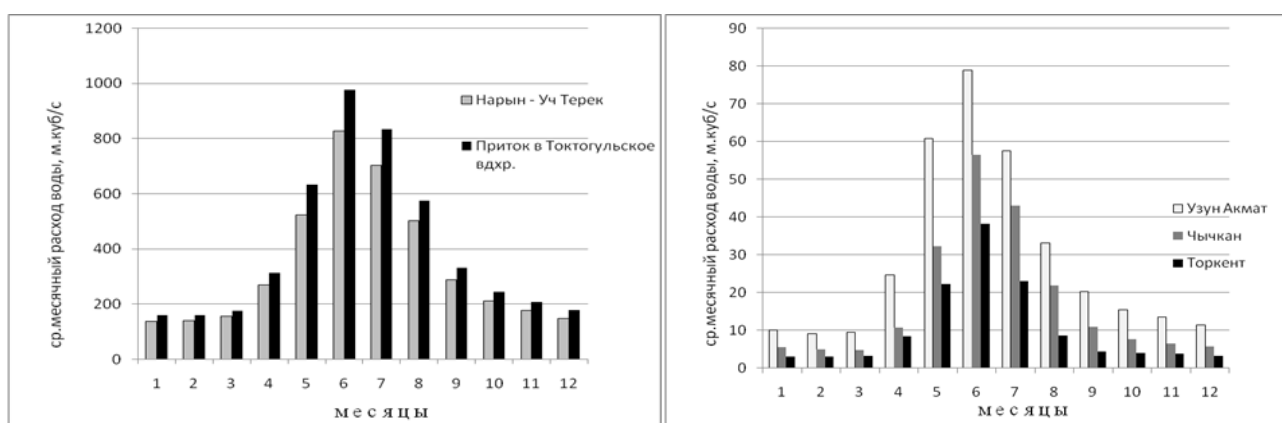


Рис. 2.3. Среднемесячные расходы воды ($\text{м}^3/\text{с}$) рек Нарынского бассейна, составлено автором по данным фондов Кыргызгидромета [25].

Уровень залегания грунтовых вод различный. В Суусамырской, Ат-Башинской и некоторых других межгорных впадинах происходит выклинивание на поверхность грунтовых вод и образуются сазовые болота. Грунтовые

воды межгорных впадин Внутреннего Тянь-Шаня, наоборот, бедны и находятся на большой глубине [72].

2.2. Физико-географические условия бассейна реки Нарын

2.2.1. Геологическое строение, орография и рельеф поверхности

Современный рельеф Тянь-Шаня сформировался в конце третичного и начале четвертичного периода. Основные формы рельефа представлены горными хребтами, вытянутыми в широтном направлении между Таримским щитом и Сибирской платформой. Горные цепи разделены межгорными впадинами, также имеющими широтное простираие (Рис. 2.4.).

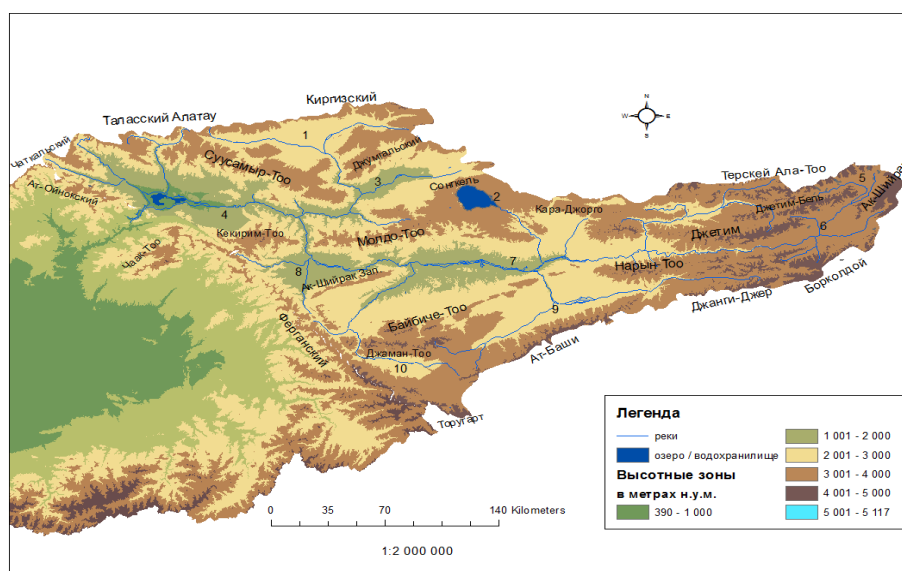


Рис. 2.4. Орографическая схема Нарынского бассейна. Цифрами на схеме обозначены межгорные впадины. Высокогорные: 1. Суусамырская, 2. Сонкельская, 5. Арабель-Кумтерская, 6. Верхненарынская (Тарагай), 9. Атбашы-Каракоюнская, 10. Арпинская. Среднегорные: 3. Джумгалская, 7. Средненарынская, 8. Тогуз-Торооская. Низкогорные: 4. Кетмень-Тебенская.

Выделяются три основные ветви Тянь-Шаня: Северная, Средняя и Южная. Северная ветвь представлена системами Заилийского Алатау, Кунгей Ала-Тоо, Киргизского хребта и Таласского Алатау, в пределах Нарынского бассейна

входят южные склоны Киргизского хребта, Таласского Алатау и Чаткальского хребта. Северная и Средняя ветви отделены синклинальным прогибом, в котором расположены Иссык-Кульская, Кочкорская и Суусамырская (в пределах Нарынского бассейна) межгорные котловины.

Средняя ветвь Тянь-Шаня включает горные хребты Суусамыр-Тоо, Джумгалский, Терскей Ала-Тоо, Ак-Шийрак, Джетим-Бель, Джетим, Молдо-Тоо и Кекирим-Тоо. Горные хребты разделены депрессиями второго порядка, также вытянутыми в широтном направлении.

Южную ветвь Тянь-Шаня образуют хребты Борколодой, Нарын-Тоо, Ат-Баши и Джаман-Тоо. Диагональная перемычка в виде Ферганского хребта и хребта Торугарт, расположенных к западу от Нарынской депрессии, соединяет все три ветви Тянь-Шаня.

Наряду с тектоническим происхождением, современный облик рельефа Тянь-Шаня формировался под влиянием четвертичного оледенения и речной эрозии.

Характерной особенностью орографии Нарынского бассейна является расхождение и расширение межгорных впадин в западном направлении, впадины имеют клиновидную форму с острым концом на востоке. Территория Нарынского бассейна понижается в западном направлении, абсолютная высота хребтов в гребневой части понижается на 2-3 м на км, а межгорные котловины – на 7 м на км. Относительная высота хребтов в западном направлении увеличивается. Так, относительная высота гор Ак-Шийрак над Кумторскими сыртами составляет 700-800 м., а Чаткальского и Ат-Ойнокского хребтов – 2000 м. и более.

Степень расчлененности рельефа также увеличивается в западном направлении. В гребневой зоне хребта Ак-Шийрак колебания высот составляют 500-700 м., а перевалы Чаткальского хребта – 1000-1300 м. от наибольших высотных отметок. Восточная часть Внутреннего Тянь-Шаня имеет древние поверхности выравнивания с ледниковыми отложениями, ледниковыми формами рельефа, моренами. В период последнего оледенения ледники выходили на

прилегающие к хребтам Ак-Шийрак, Борколдой и Джетим-Бель равнины. Здесь представлен древнеморенный рельеф с невысокими холмами и неглубокими озерами, реками со спокойным равнинным обликом.

Эрозионные формы рельефа преобладают в горах Центральной и Западной части бассейна. Ледниковые формы развиты только в гребневой части гор. В межгорных впадинах, где не было оледенения, реки имеют хорошо выработанное русло с большим количеством террас в несколько ярусов.

Темой диссертации является исследование изменений водных ресурсов, в связи с чем, особое внимание уделено описанию рельефа межгорных впадин в бассейне Нарын, где формируются основные притоки реки.

Арабель-Кумтерская впадина. Долина реки Арабель или Арабельские сырты, а также Кумторские сырты имеют схожую историю развития и характер рельефа. В прошлом долины были заняты четвертичным оледенением и в настоящее время имеют мощные моренные отложения и холмистый рельеф. Высотные отметки днища долины Арабель – 3600-3800 м. В отличие от Арабельских сыртов, на Кумторских сыртах начинает проявляться речная эрозия и формироваться речные террасы. На территории Кумторских сыртов расположено озеро Петрова.

Еще одна высокогорная котловина – Сонгкельская. Имеет высоту днища долины – 3044-3100 м. Значительную часть котловины занимает озеро Сонгкель. Озеро окружено заболоченной равниной с зарослями кочкарника. Древние береговые валы высотой 1,5 метра занимают северный берег озера, но наибольшую часть котловины занимает пролювиально-озерная равнина. Рельеф преобладает слабоволнистый с логами и невысокими валами. В восточной части расположен мелкосопочник, имеющий высоты к северо-западу – 3100-3900 м. Высота сопков достигает 20-30 м.

Северную часть Нарынского бассейна занимает Суусамырская котловина. Котловина вытянута с востока на запад в виде треугольника, длиной 100 км и шириной 15-20 км. Здесь расположены долины рек Суусамыр и Западный Каракол. Западная часть днища долины имеет высоту 2300-2600 м, отделена от

центральной части высокими куполообразными горами. Центральная часть днища долины имеет высоту 2000-2400 м. В рельефе встречаются останцы высотой 500-700 м. в виде гряд и плато. В нижней части долины реки Суусамыр и Западный Каракол образуют заболоченную пойму с десятками разветвленных рукавов.

Далее к югу расположена Джумгальская впадина. К западу впадина расширяется и понижается с 2200 до 1500 м. Река Джумгол имеет спокойное течение, заболочена и разбивается на рукава, сливаясь, на западе, с рекой Кекемерен. Облик рельефа Джумгальской впадины разнообразен. Левобережная часть имеет слившиеся конусы выноса в верховьях, ниже расположены валы предгорной зоны хребта Северный Кавак-Тоо. Правобережная часть имеет четкие террасы с цоколем, сложенным третичными отложениями или палеозойскими породами. В западной части долины в междуречье расположен мелкосопочник с многочисленными пещерами, провалами и другими явлениями глинистого карста.

В западной части Нарынского бассейна расположена Кетмень-Тебенская котловина, вытянутая по широте на 50 км и имеет высоту днища 800-1000 м с понижением на запад. Здесь река Нарын принимает три ее правобережных притока – Узун-Акмат, Чычкан и Торкент. Основная часть днища долины представляет собой плоские поверхности низких речных террас.

Верхненарынская котловина расположена в восточной части Нарынского бассейна и представляет собой широтно вытянутую тектоническую депрессию, занятую рекой Большой Нарын. Длина впадины около 90 км, ширина – 8-12 км. Большой Нарын имеет широкое галечное русло с многочисленными рукавами. Несколько речных террас прослеживаются в восточной части бассейна – в верховьях Тарагая и Карасая, к центральной части они скрываются в отложениях современного аллювия. Ниже, в западной части впадины опять проявляются характерные речные террасы. Характерные для четвертичного оледенения моренные холмы расположены в восточной части долины реки Кара-Сай, а также характерно наличие развееваемых песков на больших пространствах левого бе-

рега Кара-Сая в нижнем течении. Подобная особенность рельефа большая редкость, так как развеваемые пески расположены на высоте 3500 метров в зоне вечной мерзлоты.

Западнее Верхненарынской расположена Нарынская котловина. Она имеет длину в широтном протяжении 150 км, расширяясь на запад на 50-60 км. Высота днища составляет 2300 м. на востоке до 1400 на западе. Котловина заложена была в палеогене и в течение третичного периода погружалась под отложения Тянь-Шанского орогенического комплекса. Общая мощность отложений достигает 3000 м. Здесь широко развиты речные террасы, их насчитывается к востоку около 15-и [1]. В уступах всех террас и поймы обнажается цоколь. В центральной части долины террасы становятся аккумулятивными и их насчитывается 5-7, а к западу их число снова растет, и они становятся цокольными. Это говорит об интенсивном поднятии западной и восточной части долины. Характерная особенность рельефа котловины – наличие на 4 и 5 речных террасах лессовидных суглинков с разветвленной овражной сетью, а также карстово-суффозионных вороной диаметром 10-15 м. и глубиной – 5-8 м., образуя лабиринт из сети слепых оврагов и пустот [1]. Большая часть днища Нарынской котловины представляет собой мелкосопочник, сложенный третичными глинами, песчанниками и конгломератами сильно засоленными и не покрытыми растительностью.

Тогуз-Торооская впадина является продолжением Нарынской впадины на западе и имеет протяженность с запада на восток 50 км, ширину 20-25 км, высоту днища 1300-1400 м [1]. В пределах ее территории, р.Нарын меняет свое направление на северное. Отличительная черта рельефа – широкое развитие высоких речных террас, сложенных в основном четвертичными конгломератами с цоколем из коренных пород на поверхности. Восточную часть впадины занимает мелкосопочник на сильно засоленных третичных отложениях.

Во Внутреннем Тянь-Шане расположена Ат-Башы-Каракоюнская межгорная впадина, имеющая длину 150 км, ширину – до 30 км и высоту днища – 2800-2000 м. Река Ат-Башы занимает восточную часть котловины, а Кара-Коюн

– западную. Отличительная особенность рельефа – развитием речных террас, наибольшее их число в верховьях Кара-Коюна – до 14 цокольных террас в одном поперечном профиле, а в восточной части развиты только нижние надпойменные террасы [1]. Повсеместно развиты 4 и 5 речные террасы, на которых, при слиянии двух рек, встречаются суффозионные воронки. Большая часть впадины занята бэдлендом на третичных отложениях, у подножия Ат-Башинского хребта – пролювиальная равнина с четвертичными отложениями мощностью 10-20 м.

К западу от Ат-Башы-Каракоюнской впадины расположена наиболее высокогорная – Арпинская впадина с высотой днища 3100-2750 м., протяженностью 50 км и шириной до 15-20 км [1]. Южная часть котловины занята галечником, с отдельными холмами, третичными песчаниками и мергелями, северная – волнистой поверхностью с холмами из третичных пород. Речные террасы развиты в нижнем течении реки Арпа и сложены красными конгломератами и песчаниками.

Бассейн реки Нарын имеет отложения разного возраста: докембрийские, кембро-силурийские, нижний и средний карбон, в меньшей степени верхний карбон и пермь, юрские рыхлые отложения мезозоя, третичные и четвертичные отложения палеозоя во впадинах. В северной части – гранитные интрузии различного возраста.

Отложения третичного и четвертичного возраста в межгорных депрессиях имеют мощность 3000-5000 м. (например, в Нарынской, Ат-Башы-Каракоюнской, Джумгальской, Кетмень-Тюбинской и Суусамырской котловинах). В высокогорных котловинах третичные отложения или отсутствуют, или представлены неполно. Петрушевский Б.А. и Шульц С.С. выделяли три свиты третичных отложений: красную (палеоген-неогеновую или меловую), палеобурую или розовато-серую (неогеновую) и серую (неоген-четвертичную). Свиты имеют сходное литологическое строение, но различия в крупности и грубости обломочного материала [73, 74].

Красная свита имеет мощность от 100-200 до 500 м, распространена в Ат-Башинской, Джумгальской и Кетмень-Тюбинской, в восточной части Нарынской котловины и в верховьях Малого Нарына [1]. Палево-бурая свита развита шире, выходит на поверхность во Внутреннем Тянь-Шане. Мощность ее в бассейне реки Ат-Баши достигает свыше 3500 м. Обе третичные свиты сильно засолены. В них обнаружены гипс, каменная соль и мирабилит [1]. Серая свита имеет наиболее широкое распространение и залегает на палево-бурой свите. Ее отложения встречаются и в высокогорных впадинах: Верхне-Нарынской и Арпинской.

Помимо описанных свит в бассейне реки Нарын широко развиты более молодые – пролювиально-делювиальные, гляциальные, аллювиальные и озерные отложения. Пролувиально-делювиальные отложения образуют конусы выноса у подножия гор и сложены грубообломочным материалом (камни, щебень, галька, обломки скал). Гляциальные отложения развиты в сыртовых долинах Арабеля, Тарагая, Кара-Сая, а также в высоких хребтах Ак-Шийрак, Джетим, Джетим-Бель, Нарын-Тоо и др. Это морены из обломков коренных пород (валунов), в меньшей степени из щебня и суглинка. Древнеледниковые озера сложены тонкослоистыми суглинками, песками, глинами, галечниками и супесями. Аллювиальные отложения в виде песчанников и галечников перекрывают ледниковые отложения в высокогорных котловинах и сыртах или породы третичного периода. Молодые озерные отложения представлены тонкозернистым слоистым глинистым, суглинистым или супесчаным материалом в Сонгкельской котловине [1].

2.2.2. Климатические особенности бассейна реки Нарын

Орография Нарынского бассейна определяет его основные климатические особенности. Широтное простиранье хребтов и постепенное повышение высот к востоку, значительные различия в высоте местности характеризуют климатическое разнообразие бассейна.

Суровость, континентальность и сухость территории отмечены многими известными климатологами А.И. Воейковым и другими [75]. Больше всего континентальность климата проявляется в межгорных впадинах причем, чем больше абсолютная высота днища впадины, тем меньше разница между зимними и летними температурами воздуха. Так в долинах рек Нарын и Суусамыр разница между зимними и летними температурами составляет 34,2 - 35,0°C, а на Тянь-Шане эта разница составляет 25,5°C. Максимальные температуры воздуха отмечаются во второй половине июля и первой декаде августа, самый холодный месяц зимы – январь (во Внутреннем Тянь-Шане). Амплитуда крайних температур воздуха в бассейне реки Нарын большая и возрастает к западу, от 64°C в Тянь-Шане до 81°C в Суусамыре. Продолжительность зимы в западной части бассейна составляет 1-2 месяца, а на востоке – в истоках на высоте 4000 м. около 8 месяцев. Лето жаркое и сухое в нижнем и среднем течении Нарына, прохладное и холодное – в верховьях, его продолжительность колеблется от 2 до 5 месяцев в зависимости от высоты местности.

Наибольшее количество осадков, в связи с западным переносом воздушных масс, выпадает в западной части Нарынского бассейна на северных и западных склонах хребтов (600 мм в год). Наименьшее количество осадков отмечается на склонах в ветровой тени и в межгорных впадинах и не зависит от высоты днища долины (200 мм в год). В пределах отдельных межгорных впадин наиболее увлажнены восточные части (Нарынская, Ат-Башинская, Суусамырская, Джумгальская). На склонах хребтов количество осадков увеличивается с высотой. В верховьях реки Нарын, на высоте 2800 – 3600 м., осадков мало 185-310 мм. [1].

Можно отметить, что летние осадки преобладают над зимними, а весной наблюдается усиление циклонической деятельности, как следствие усиления контрастов между температурой почвы и воздуха при смещении полярного фронта к северу. Поэтому в нижнем течении Нарына годовой максимум осадков приходится на март-апрель, в среднем течении – на май-июнь, а в верхнем течении и высокогорных впадинах – на июнь-июль. В целом в бассейне Нарына

количество осадков невелико и зимой наблюдается маломощный снежный покров. На Кумторских и Арабельских сыртах устойчивый снежный покров формируется в начале октября, а в западной части бассейна – во второй половине ноября. Наибольшая высота снежного покрова отмечается в конце марта, в котловинах снег тает в первой половине апреля, а на сыртах – в конце мая [1].

Современный климат Нарынского бассейна наиболее подробно описал О.А.Подрезов [42]. Он дал характеристику основным метеорологическим величинам по высотным диапазонам и разрезам. По его мнению, изменение основных метеорологических величин связано в большей степени не с высотной климатической зональностью, а с макро-мезо и микрорельефными условиями конкретного места или пункта наблюдений. Для выявления высотных зависимостей метеорологических величин О.Н.Подрезов провел анализ на однородность макро-мезо и микрорельефные условия.

На территории Кыргызстана (Тянь-Шаня) выявляют 4 климатических провинции: Северный, Северо-Западный Кыргызстан, Иссык-Кульская котловина, Юго-Западный Кыргызстан и Внутренний Тянь-Шань. Наиболее хорошо освещен метеонаблюдениями Северный и Северо-Западный Тянь-Шань, остальная часть территории освещена довольно слабо [76].

В пределах территории Кыргызстана выделяется несколько климатических поясов [77]:

- 1). Низкогорный долинно-предгорный пояс (от 500-600 до 900-1200 м.), характеризующийся жарким летом (средние температуры июля около 25 °С), умеренно-прохладной зимой (средние температуры января – 3..., -5 °С), часто без устойчивого снежного покрова, с большим дефицитом осадков в году.
- 2). Среднегорный пояс (от 900-1200 м. до 2000-2200 м.) имеет типичный умеренный климат с теплым летом (средние температуры июля 20..., 15 °С) и умеренно-холодной зимой (средние температуры января около -5..., -15 (-20) °С) с устойчивым снежным покровом и дефицитом осадков в году.
- 3). Высокогорный пояс (от 2000-2200 до 3000-3500 м.) имеет климат с прохладным летом (средняя температура июля колеблется от 10 до 15 °С) и холодной

зимой (средняя температура января от -10 до -20 °С) малоснежная в ряде районов.

4). Нивальный пояс (от 3500 м. и выше) характеризуется суровым очень холодным климатом (средняя температура июля около 5 °С, а средняя температура января ниже -20 °С). Здесь расположен пояс скал, снежников и горных ледников, возникающих за счет аккумуляции влаги, на высотах более 3700-4000 м. развито оледенение.

Температура воздуха в горах линейно понижается с высотой со средним градиентом около 5 °С [78]. Вычисление линейных регрессий средних годовых и максимальных (среднего из годовых максимумов и абсолютного максимума) температур воздуха для высотного диапазона различных климатических провинций, в том числе и для Внутреннего Тянь-Шаня было проведено О.А. Подрезовым. Степень коррелированности средних и максимальных температур с высотой была -0,89...,-0,95. Однако получение таких зависимостей для минимальных температур в связи с радиационными температурными инверсиями оказалось невозможным. Коэффициенты корреляции минимальных температур с высотой составили -0,3 и -0,2 [42].

Определением высотных зависимостей годовых сумм осадков Внутреннего Тянь-Шаня и других климатических провинций занимались исследователи М.Б. Дюргеров, А.Н. Диких, П.Н. Пономаренко, В.А. Кузмиченок и О.А. Подрезов.

Так, по данным Дюргерова М.Б, высотный градиент осадков для Внутреннего Тянь-Шаня (верховья реки Нарын) приведен только для ограниченного диапазона [79, с.54]:

- для диапазона высот 2,84-3,615 с интервалом осадков 185-305 мм, составляет 155 мм;

- для долины реки Суусамыр в диапазоне высот 1,6 – 3,0 км с интервалом осадков 230-450 мм составляет 146 мм на 1 км.

П.Н. Пономаренко описывал распределение годовых сумм осадков по высотным диапазонам через 500 метров подразделяя их на 3 класса: открытые до-

лины и наветренные склоны, в западной части; узкие и относительно закрытые районы центральной части; и закрытые долины, ущелья, подветренные склоны, в восточной части и на сыртах [80] (Рис. 2.5)

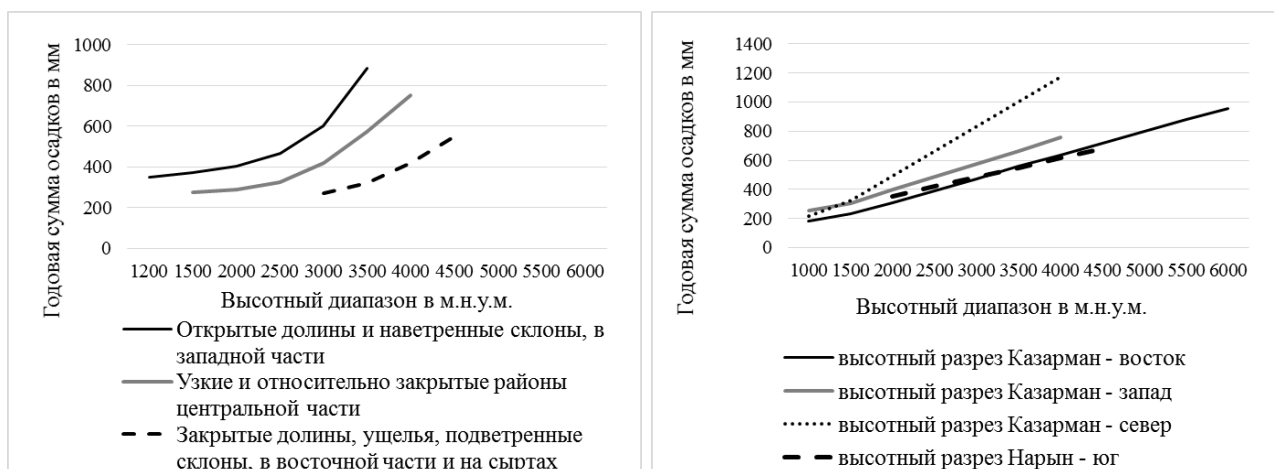


Рис. 2.5. Высотные зависимости годовых сумм осадков во Внутреннем Тянь-Шане по данным П.Н. Пономаренко [80] и О.А. Подрезова [46], составленный автором.

Другой подход использовал к описанию годовых сумм осадков О.А. Подрезова, рассчитав их по линейным зависимостям четырех высотных разрезов, проведенных по линиям: Казарман – восток проходит вдоль широтной зоны 41 – 42° с.ш. до крайней восточной точки с долготой 80, 27° в.д.; Казарман – запад – от г.Казарман до Ферганского хребта; Казарман – север – от г.Казарман до гребня Киргизского хребта; и Нарын – юг – от г.Нарын до гребня Кокшаал-Тоо [42] (Рис. 2.5). Расчеты годовых сумм осадков по высотным зонам О.А. Подрезова проводились по линейным уравнениям, коэффициенты корреляции при этом составили (R^2) 0,755–0,861.

В работе В.А. Кузмиченка [81] представлена карта для определения осадков для различных высотных зон Внутреннего Тянь-Шаня и результаты работы П.Н. Пономаренко не противоречат его выводам.

Сведения о распределении осадков на территории Внутреннего Тянь-Шаня имеют не только научный, но и практический интерес.

2.2.3. Почвенный покров и растительность

На территории бассейна реки Нарын выделяются следующие вертикальные растительные пояса:

1. Гляциально-нивальный находящийся выше 3200 (4000) м.н.у.м.;
2. Альпийский – в высотном диапазоне 3000 (3500) – 3500 (4000) м.н.у.м.;
3. Субальпийский – 3000 – 3500 м.н.у.м.;
4. Лесо-лугостепной – 1500 (2800) – 3000 м.н.у.м.;
5. Степной – 1000 (1600) – 2200 (3000) м.н.у.м.;
6. Полупустынный – 700 (1600) – 1200 (2200) м.н.у.м.;
7. Пустынный 500 (1600) – 700 (1800).

Гляциально-нивальный пояс – это пояс современного оледенения с ледниками, снежниками, скалистыми обнажениями, осыпями и моренами. Растительный покров в этом поясе отсутствует или представлен случайными единичными растениями или группами. Почвообразование в этом поясе отсутствует.

Альпийский пояс распространен по всему бассейну реки Нарын. В восточной части бассейна он занимает как склоны хребтов, так и днища высокогорных впадин (Арабельские и Кумторские сырты). Суровость условий этого пояса способствовала образованию форм растений – подушек. Так подушки дриадоцвета образуют здесь дриадантовые пустыни, развитые на малогумусных такыровидных почвах сформированных на валунном суглинке. Близко к поверхности на такыровидных почвах расположен слой вечной мерзлоты.

На хорошо прогреваемых склонах южных экспозиций распространены сухие разновидности кобрезиевых лугов на высокогорных лугово-степных почвах, а по склонам северных экспозиций на мелкоземнистых или слабоземнистых почвах – альпийские разнотравно-злаковые луга. Количество гумуса в верхнем горизонте лугово-степных почв колеблется от 6 до 10%.

В понижениях рельефа на сыртовых равнинах в условиях хорошего увлажнения на полуторфянистых почвах растут осоковые луга на горно-луговых дерновых полуторфянистых почвах. Здесь, в местах с выходом грунтовых вод создаются условия избыточного увлажнения, а низкие температуры препятствуют разложению органических остатков до состояния гумуса. Горно-луговые дерновые почвы наиболее высокогумусны из альпийских почв, содержание гумуса в верхнем горизонте – 10-12%. Наиболее сухие из альпийских почв – высокогорные степные расположены на сыртовых равнинах в западной части бассейна реки Нарын под единичными дернинами типчака тянь-шанского среди такыровидных почв. Количество гумуса в них 3-6%. В этом поясе также распространены альпийские степи с овсяницей и лугостепи с влаголюбивым разнотравьем.

Субальпийский пояс с более мягким и теплым, по сравнению с альпийским поясом, где добавляются кустарники (арча туркестанская, карагана гривистая и др.). Среди луговых травостоев в восточной части бассейна распространены шемюровые луга и луга с преобладанием манжетки, а в западной части, на склонах, обращенных к Ферганскому хребту – гераниевые и ирисовые луга. В этом поясе распространены также лугостепи, где большие площади заняты под мелкодерновинные степи. В Нарынской впадине своеобразный полупустынный травостой с полынью тянь-шанской и красноцветковой, ковыли, терскен, горькуша. Травостой здесь низкий и изреженный, покрытие поверхности почвы растениями – 20-25%. Используются эти территории как бедные весенне-осенне-зимние пастбища. Почвенный покров этого пояса представлен горно-луговыми черноземовидными почвами в верхней части субальпийского пояса, развитыми на склонах северной экспозиции восточной части Нарынского бассейна, по свойствам сходные с горно-луговыми дерновыми почвами, с содержанием гумуса 11-14%. Под остепненными лугами развиты горно-лугостепные почвы в комплексе с луговыми почвами. На склонах южной экспозиции в западной части бассейна реки Нарын формируются горно-степные каштановидные почвы. Они развиваются на глинистом эллювии и делювии коренных по-

род, содержание гумуса в них всего 3-5%. Из-за суровости климата почвы субальпийского и альпийского пояса не используются в земледелии.

Лесо-луго-степной пояс на западе бассейна реки Нарын и на остальной территории различен. В целом леса занимают менее 20% территории пояса, большая же часть покрыта кустарниками, лугами, арчовыми редколесьями, степями и лугостепями. Лесо-луго-степной пояс центральной и восточной части бассейна занимает высотный диапазон 2500-3500 м. и состоит из еловых лесов, среднетравных лугов, лугостепей и мелкодерновидных степей, ниже, на высоте 1500-2500 метров расположен пояс степей. Западные склоны Ферганского и Атойнокского хребтов на тех же высотах также заняты травостоем и хвойными лесами, а на высоте 1500-2500 – подпоясом лиственных лесов. Подпояс лиственных лесов состоит из ореховых, орехово-плодовых и плодовых лесов, южных высокотравных лугов и лугостепей и зарослей южных кустарников.

Под ельниками формируются горно-лесные темноцветные (бурые) почвы. В верхней части они сложены пылеватым суглинком, а в нижней имеют щебнистый или хрящеватый горизонт с включениями коренных пород. В верхнем полуторфянистом горизонте горно-лесные бурые почвы содержат большое количество гумуса – 12-15%. Под орехово-плодовыми лесами, где летние и зимние температуры воздуха значительно выше, чем в еловых, формируются черно-бурые горно-лесные почвы, содержание гумуса в которых значительно выше – до 23%. В этом же поясе на высоте 2200-3000 м.н.у.м. под типчаково-разнотравными закустаренными степями и лугостепями формируются коричневые типичные почвы с содержанием гумуса 6-8%. Ниже формируются коричневые карбонатные почвы на пырейно-разнотравных степях с редким кустарником, которые на выровненных участках используются как хорошая бога-ра для зерновых культур.

Степной пояс расположен в центральной и восточной части бассейна реки Нарын в пределах высотного диапазона 1500 – 2500 м.н.у.м. Он занимает значительную территорию и большую вертикальную протяженность. Степной пояс хорошо выражен в центральной и западной частях бассейна, к западу от

Ферганского хребта занимает небольшую территорию. В центральной части бассейна реки Нарын характерно распространение типчаковых и полынно-ковылково-типчаковых степей. На засоленных третичных отложениях, которые занимают днища Нарынской, Джумгальской, Тогуз-Тороусской и Ат-Башинской котловин пестроцветях, распространена растительность с преобладанием полыней, ковылей и солянок.

Почвы степного пояса в верхней части представлены каштановыми почвами, сформированными под типчаком и полынями. На северных склонах – горные черноземы под злаково-разнотравными луговыми степями. В нижней части пояса – светло бурые тяньшанские почвы, сформированные в сухих степях под полынями и солянками. Горные черноземы расположены в диапазоне высот 2200 – 2800 м.н.у.м. Травостой на этих почвах очень густой и разнообразный по видовому составу. Здесь растут и луговые и степные виды растений. Почвы развиваются на крутых склонах и имеют укороченный почвенный профиль, а также большую щебненность, поэтому, несмотря на плодородие, не используются в земледелии. Горные каштановые почвы расположены на высотах 2200 – 2500 м.н.у.м., и формируются под степной и сухостепной растительностью. Они делятся на горные темно-каштановые почвы под типчаково-ковыльной степью, и, расположенные ниже на южных экспозициях – светло-каштановые почвы под более изреженной и ксерофильной растительностью. Содержание гумуса в первом типе почв – 4-6%, а во втором – 2-5%. На ровных участках они используются под поливные сенокосы. В нижней части степного пояса, до высоты 2200 м.н.у.м., расположены светло-бурые центральнотяньшанские почвы, занимающие днища межгорных впадин и нижние части склонов. Климат здесь отличается крайней сухостью (150-250 мм. осадков в год), из растительности преобладает полынь, типчаки и солянки с проективным покрытием – 30-40%. Эти почвы сильно засолены, содержание гумуса в них очень низкое – 1-2%.

Полупустынный пояс растительности расположен на высоте 700-1500 м.н.у.м. в основном в западной части Нарынского бассейна – в предгорьях и

нижних частях склонов Ферганского и Чаткальского хребтов, в Тогуз-Тороусской и Кетмень-Тебинской впадин, а также на высоте до 2200 м. на сильно расчлененном мелкосопочнике Нарынской, Ат-Башинской и Джумгальской впадин. В зависимости от экспозиции склонов и условий увлажнения здесь распространены полынно-эфемерово-солянковые, полынные, полынно-ковыльковые, пустынные полукустарники и засухоустойчивые злаки. На обнажениях пестроцветов расположена сильно разреженная опустыненная растительность, покрывающая не более 10% поверхности почвы. На материале размыва пестроцветов речных террас и пролювиальных равнин межгорных впадин формируются своеобразные солончаки и солончаковые пустыни. На затененных и наиболее увлажненных склонах северных экспозиций распространены бородачевые степи на мягких лессовидно-суглинистых и каменисто-щебнистых почвах. Значительные территории занимают сарындызовые степи на малогумусных и каменисто-щебнистых почвах. Меньше распространены прангосово-феруловые травостой и пырейные степи.

Пустынный пояс встречается в крайней юго-западной части бассейна реки Нарын и небольшая территория Ферганской долины. Почти вся она освоена под орошаемое земледелие из естественной растительности лишь небольшие участки травостоя из солянок, полыней и эфемеров.

Почвы полупустынного и пустынного пояса представлены сероземами, расположенными не выше 1500-1800 м.н.у.м. Основная масса осадков здесь формируется в прохладное время года, лето жаркое и сухое, годовое количество осадков менее 300 мм и почвы здесь имеют непромывной режим. Почвообразующие породы – лессовидные суглинки и галечниково-конгломератовые четвертичные толщи и содержание гумуса в них 1-3%. В верхней части полупустынного пояса распространены темные сероземы – на высоте 1200-1500 м. и выше под пырейно-разнотравной растительностью. Содержание гумуса в них – 3-5% и темные сероземы используются под посевы зерновых культур при богарном и поливном земледелии. Обыкновенные или типичные сероземы занимают высоты от 700 до 1200 м.н.у.м. на территориях днищ Кетмень-Тюбинской

и Тогуз-Тороусской впадин, низкие предгорья и и подгорные равнины Ферганской впадины. Еще ниже, до 700 м., в пределах Ферганской котловины на низких подгорных шлейфах и пролювиальных равнинах расположены светлые сероземы под пустынной растительностью с полынями, солянками и эфемерами. Содержание гумуса в обычных или типичных сероземах 1-2%, в светлых сероземах – 1%. Значительные массивы их орошаются и используются под посевы хлопчатника.

Значительной антропогенной нагрузке подвергаются ландшафты Средне-Нарынских впадин. Э.Т. Бокоевой для Средне-Нарынского бассейна была разработана среднемасштабная (1:200000) ландшафтная карта, где основной картируемой единицей служит вид ландшафта, были также выделены высотнo-зональные геосистемы с двумя группами ландшафтов, приуроченных к днищам внутригорных впадин и горных склонов. На ее основе была составлена карта антропогенной модификации систем, где показана антропогенная нагрузка, приводящая к негативным экологическим последствиям, возникающим в результате нерационального использования природных ресурсов Средне-Нарынских впадин. Экономическое развитие средней части Нарынского бассейна должно учитывать последующие возможные природоохранные проблемы, связанные с нерациональным использованием природных ресурсов [82].

2.2.4. Гидрография

Река Нарын образуется слиянием Большого и Малого Нарына в 44 км восточнее от г.Нарын. Ниже по течению на 21 км от г.Нарын, река Нарын принимает притоки справа реки Он-Арча, Джерге-Тал, Каджырты (вытекающая из оз.Сонгкель). Затем слева впадает один из крупнейших притоков река Ат-Баши, ниже по течению несколько небольших притоков и слева крупный приток - реку Алабуга. Далее ниже по течению река Нарын принимает несколько небольших притоков слева и справа и, на выходе в межгорную котловину Тогуз-Тороо, в реку Нарын слева впадает крупнейший приток Кек-Ирим, а еще через

32 км справа принимает крупнейший приток Кекемерен. Далее на реке Нарын находится крупнейшее в Кыргызстане Токтогульское водохранилище, в которое впадают правобережные притоки Торкент, Чычкан и Узун-Акмат – боковые притоки в Токтогульское водохранилище. Ниже по течению слева впадает Кара-Суу (левая) и дальше справа – Кара-Суу (левая). Ниже устья Кара-Суу (правой) река Нарын выходит в Ферганскую долину и, сливаясь с рекой Карадарья, образуют реку Сырдарью. Общая площадь бассейна реки Нарын по данным В.Л.Шульца составляет 59110 км², из которых 58370 км² (98,8% приходится на водосбор реки Нарын) [3].

Река Большой Нарын (длина реки 188 км, площадь – 5850 км²) берет истоки с южного склона хребта Терской Ала-Тоо и с северных и восточных склонов хребта Джетим-Бель – река Ара-Бель-Суу, и, с хребта Ак-Шийрак, из ледника Петрова – река Кум-Тер. Первый исток река Ара-Бель-Суу протекая по сырту с небольшим падением, делится на два рукава и, приняв приток Кашка-Суу и обогнув хребет Джетим-Бель, поворачивает на юго-запад и далее протекает параллельно реке Кум-Тер. Другой исток, более водоносный, река Кум-Тер вытекая из ледника Петрова делится на множество протоков и ниже морен собирается в одно русло. Реки Ара-Бель-Суу и Кум-Тер, сливаясь, образуют реку Тарагай, которая ниже меняет название на Якташ. Сырты Кум-Тера и Ара-Бель-Суу имеют множество ледниковых озер, но больше всего их в верховьях реки Ара-Бель-Суу у южных склонов Терской Ала-Тоо. Долина реки Тарагай-Якташ представляет собой ущелье, которое расширяется и имеет на волнистой, песчаной поверхности мелкие озера. Далее русло реки разветвляется на многочисленные рукава и слева река Якташ принимает приток реку Кара-Сай с его притоком Эгизтюр. Река Кара-Сай берет истоки на хребте Ак-Шийрак и после реки Эгизтюр делится на многочисленные рукава. Река Якташ впитывается в песок и кажется пересохшей. После слияния рек Кара-Сай и Якташ река называется Большой Нарын.

Долина реки Большой Нарын корытообразная, а после впадения справа реки Каракол – V-образная. У истока дно заболоченное, ниже врезается в дно

долины, склоны долины имеют террасы. Русло реки умеренно извилистое и разветвленное. Далее в реку Большой Нарын впадает река Улан. После впадения реки Улан долина реки Большой Нарын имеет более крутые и отвесные склоны с осыпями и скальными обнажениями и почти не имеет террас. Русло реки умеренно извилистое, неразветвленное, с порогами и стремнинами. Пойма на всем протяжении реки Большой Нарын отсутствует, в межень между берегами и урезом воды образуется полоса отложений. Берега реки легко размываемые.

Река Малый Нарын (длина реки 150 км, площадь 3900 км²) берет истоки с ледников северного склона хребта Джетим-Бель с реки Буркан, которая после слияния с рекой Арчалы (левая) называется Балгарт, ниже устья реки Джаланаш (левая), получает название Малый Нарын. Долина реки Малый

Река Нарын (длина 534 км, площадь бассейна 58370 км²) от слияния Большого и Малого Нарына протекает в просторной долине [3]. От устья реки Чонкендук до устья реки Ахала долина становится узкой река не имеет поймы, затем выходит в Тогуз-Тороускую котловину с террасированными, крутыми и обрывистыми склонами с глубокими оврагами и долинами боковых притоков. От г.Нарын река имеет двухстороннюю пойму. Выше устья р. Шаро русло реки Нарын слабоизвилистое и устойчивое, между реками Шароо и Чонкендук – умеренно извилистое, разветвленное, от устья реки Чонкендук до устья реки Ахала – неразветвленное, умеренно извилистое, ниже реки Ахала опять разветвленное. После Тогуз-Тороуской котловины река Нарын поворачивает на север, а после р.Кекемерен – на запад. На протяжении 80-и км. река протекает в узком ущелье, немного расширяясь только у устья реки Кекемерен. На 60-ом километре от устья реки Кекемерен река Нарын вступает в широкую (5-10 км) террасированную Кетмень-Тюбинскую долину длиной 40 км, опять разветвляясь на рукава с широкой поймой. К западу долина переходит в скалистое ущелье до г.Уч-Курган. Здесь расположено крупнейшее Токтогульское водохранилище и несколько каскадов ГЭС.

2.2.5. Современное оледенение бассейна реки Нарын в условиях глобального потепления

Глобальное потепление, которое с середины 70-ых годов прошлого столетия идет высокими темпами, приводит в первую очередь к деградации оледенения в горных районах Центральной Азии и изменению площади ледников и, соответственно, ледникового питания реки, имеющего важное значение для орошения в засушливый летний период [83]. Все исследования по изменению климата в Кыргызстане показывают, что ход потепления здесь, хотя и отражает глобальное потепление климата, но носит существенный региональный характер. В обзоре [84] приводятся данные, свидетельствующие: 1) о более сильном потеплении в ряде горных массивов Земли по сравнению с равнинными регионами, 2) о наличии районов, где потепление уменьшается или остаётся неизменным по высоте. Исследования, проведенные по изменению климата в горных регионах Тянь-Шаня, также подтверждают наличие аналогичных тенденций. Всё это говорит о неоднородности наблюдаемых процессов потепления в горных областях Земли.

В Тянь-Шане долинные ледники являются основным компонентом площади оледенения. Количество ледников в каждом сложном бассейне обратно пропорционально их размеру. То есть по мере уменьшения размеров ледников они начинают деградировать и расщепляться, а количество ледников увеличивается относительно пороговых условий. Существует статистически значимая связь между средней летней температурой воздуха и годовыми осадками средней высоты линии равновесия. Увеличение средней летней температуры воздуха на 1°С должно соответствовать увеличению годового количества осадков на 100 мм для поддержания средней высоты линии равновесия на той же высоте [85]. Повышение температуры воздуха в Тянь-Шане за последние 60-40 лет не было компенсировано увеличением количества осадков [22, 85]. За это время Тянь-Шань потерял 14-12% площади оледенения [86-89].

Ускорение темпов сокращения площади ледников Тянь-Шаня отмечали исследователи – гляциологи Т.Больш, С.Кутузов, В.Б.Айзен [90, 91, 85]. При этом сток рек не убывает, т.к. сокращение площади оледенения пока еще компенсируется возросшей абляцией [85].

Более детальные исследования изменения оледенения на территории Внутреннего Тянь-Шаня были проведены для ледника Сары-Тор (Ак-Шийрак). Исследователи Д.А. Петраков, И.И. Лаврентьев, Н.В. Коваленко и Р.А. Усубалиев провели площадные измерения толщины льда на леднике Сары-Тор с использованием георадара методом радиолокации, полевые работы по 17 км профилей, объем льда был рассчитан по модели GlabТор, откалиброванной по данным радиозондирования и региональной зависимости объема ледника от его площади [92]. Оба подхода с высокой точностью позволили определить объем ледника Сыры-Тор. По сравнению с 1977-2003 годами темпы сокращения площади ледника замедлились. В период 1977-2003 гг. она сокращалась на 0,77% [85] в 1987 – 2003гг. – на 0,80% в 2003 – 2012 гг. – на 0,67%. Исследователи объясняют сокращение темпов таяния ледника отсутствием значимых трендов с повышением летней температуры за 2000 – 2010 гг., а также частичным приспособлением ледника к изменившимся климатическим условиям. Выводы исследователей о темпах сокращения ледника Сары-Тор за период с 1977 по 2012 годы хорошо согласуются с темпами сокращения ледников бассейна Верхнего Нарына, сделанными В. Хаггом. В. Хагг с использованием спутниковых снимков, создал кадастр ледников для бассейна реки Большой Нарын, относящийся к 2007 году. Общая площадь 507-и ледников составила 471 км². По сравнению с советским ледниковым кадастром, основанным на данных середины 20-го века, общая площадь ледников сократилась на 23,4%. Текущий объем ледника составляет 26,0-33,3 км³, с середины 20-го века таким образом, было потеряно 6,6-8,4 км³ (20%) объема ледника. По мнению В.Хагга водный эквивалент 5,9-7,6 км³ был преобразован в избыточный сток и составил не менее 7,3–9,2% от общего стока за рассматриваемый период [93].

Анализ изменения оледенения Тянь-Шаня за 70-и летний период (сравнение современного состояния оледенения за 2013-2016 гг.) по данным спутниковых снимков Landsat с данными Каталога ледников СССР (по состоянию ледников в 40-70-е годы XX века) провел А.Г. Шабунин [94]. В результате выявлено, что площадь оледенения в Нарынском бассейне сократилась на 17%, при этом количество ледников, имеющих размеры менее 1 км² увеличилось почти в три раза. Площадь оледенения в верховье реки Нарын сократилась на 20%, при этом количество ледников, имеющих размеры менее 0,1 км² увеличилось почти в два раза.

По каталогу ледников СССР (Том 14, Выпуск 1, Часть 5) по бассейнам правых и левых притоков верховьев р. Нарын имелось 715 ледников, общей площадью 618.6 км², в том числе: 563 ледника размерами более 0,1 км² каждый, общей площадью 612.1 км² и 152 ледника размерами менее 0,1 км² каждый, общей площадью 6.5 км². По данным спутниковых снимков Landsat за 2013-2016 гг. всего по бассейнам правых и левых притоков верховьев р. Нарын имеется 791 ледник общей площадью 511.4 км², в том числе: 480 ледников размерами более 0,1 км² каждый, общей площадью 498.0 км² и 281 ледник размерами менее 0,1 км² каждый, общей площадью 13.4 км² [94]. Выводы, сделанные А.Г.Шабуниним таким образом не противоречат данным В.Хагга.

Изменилась также высота фирновой линии. По данным Кузьмиченка, который провел сравнительный анализ высоты фирновой линии для двух репрезентативных периодов 1945-1974 и 1975-2004 годов для территории Кыргызстана с использованием цифрового моделирования, ее максимальное увеличение отмечается в приводораздельных частях передовых горных хребтов Кыргызстана, обращенных переносу воздушных масс с севера и северо-запада. Причиной, как он считает, могло послужить существенное уменьшение количества осадков и увеличение температуры воздушных масс [95]. Деградация оледенения приведет к тому, что в конце 21 века доля площади бассейна реки Нарын, относящаяся к аридной и полуаридной зоне, с увлажнением 0,30, увеличится до 25 – 35 % [96].

2.3. Методы исследования

2.3.1. Методика оценки влияния климатических параметров на сток реки Нарын и его компоненты

В целях выявления изменений в стоке рек Нарынского бассейна были построены скользящие тренды с пятилетним периодом и разностные интегральные кривые стока. После проведения анализа циклов за многолетний период наблюдений, были рассчитаны изменения стока в расходах воды ($\text{м}^3/\text{с}$) и в процентах за выбранные периоды.

Учитывая все разнообразие климатических условий Нарынского бассейна, автор диссертации пришла к выводу, что необходимо учитывать информацию об изменениях метеопараметров во всех частях Нарынского бассейна.

Для проведения анализа влияния различных климатических факторов (количества осадков, температуры воздуха за различные сезоны, даты перехода температуры воздуха через 0°C , продолжительности залегания и максимальной высоты снежного покрова) на сток реки Нарын была построена корреляционная матрица. Данный анализ позволил выделить наиболее эффективные метеопараметры по вкладу в динамику стока рек Нарынского бассейна. Далее были проанализированы тенденции изменения этих метеопараметров. Следующим шагом были выделены репрезентативные метеостанции и предложены уравнения на основе линейной зависимости для расчета водности рек Нарынского бассейна на период половодья.

Этот методический подход был также применен нами для рек бассейна Амударьи (Памиро-Алай) и показал свою эффективность для применения в практике гидропрогнозов [97-99].

Для оценки изменения основных источников питания (грунтового стока, талого снегового и ледникового) использовался метод расчленения гидрографа [2, 10, 50].

2.3.2. Основные теоретические подходы для разработки методик долгосрочного прогнозирования стока горных рек.

Существуют различные классификации гидрологических прогнозов. В статье принята классификация ВМО [51] по четырем основным признакам:

- а) элементы водного режима;
- б) заблаговременность прогнозов;
- г) методы прогнозирования;
- д) целевое назначение прогнозов.

Согласно этой классификации прогнозы, рассматриваемые в работе, относятся к долгосрочным прогнозам объема стока (расхода воды) на вегетационный период с заблаговременностью 5-6 месяцев (с апреля по сентябрь). По целевому назначению эти прогнозы относятся к специализированным прогнозам, представляющим интерес для энергетического сектора, водного и сельского хозяйства страны. Составление прогноза стока на вегетационный период было основано на формулировании и решении уравнения водного баланса бассейна (далее, водно-балансовый метод), с использованием данных об осадках, запасе воды в снежном покрове, влажности почвы, грунтовых водах и учётом влияния на сток других факторов. Основанием для составления прогноза стока на вегетационный период служат воднобалансовые методы прогнозирования стока, основанные на использовании данных об осадках, запасе воды в снежном покрове, влажности почвы, грунтовых водах и других факторах. Важную роль в практической разработке этих методов играет корреляционный анализ эмпирических данных применительно к каждому конкретному речному бассейну.

В основу водно-балансовых методов долгосрочного прогноза (физико-статистические, математическое моделирование, вероятностный прогноз) закладываются представления о физической природе происходящих на водосборах гидрометеорологических процессах и закономерностях их протекания.

Изменения в стоке рек, предвычисление которых представляет основную задачу гидрологических прогнозов, является результатом взаимодействия процессов накопления и расходования влаги в их бассейнах. Эти процессы в бассейнах горных рек протекают особым образом, определяемые вертикальной зональностью климатических и других физико-географических условий.

Источником накопления влаги в горах являются твердые осадки. В горах Средней Азии осадки, накопившиеся в бассейнах рек в виде снега, составляют значительную долю питания этих рек. Запасы воды, накопленные в виде снега, как правило, связаны с продолжительностью снегонакопления, то есть с продолжительностью холодного периода. Осадки в виде снега составляют до 70% общего количества осадков, и обеспечивают 60% общего речного стока в Тянь-Шане [100, с. 1113-1129].

Роль жидких осадков в стоке горных рек значительно меньше. Жидкие осадки, выпадающие на снег (в апреле - мае), принимают участие в стоке наравне с талыми водами. Осадки же, выпадающие на освободившую от снега поверхность бассейна, по мнению некоторых авторов [50], практически не оказывают влияние на формирование стока. Влага, поступившая на водосбор, расходуются на испарение с поверхности почвы, с крон деревьев, на транспирацию, на инфильтрацию, на пополнение запасов подземных вод различной глубины залегания, обеспечивая так называемый базисный сток.

Общей теоретической основой для разработки долгосрочных прогнозов стока рек вышеупомянутыми методами является уравнение водного баланса речного бассейна [50]. Основная особенность его применения для горных водосборов заключается в необходимости учёта высотных и экспозиционных изменений составляющих водного баланса, в соответствии с закономерностями высотной поясности в конкретном речном бассейне. Это связано с тем, что накопление и расходование твёрдых и жидких атмосферных осадков происходят на различных высотах и экспозициях с различной интенсивностью во времени и по территории. Необходимость учёта в прогностических уравнениях такой со-

ставляющей, как сток с ледников, определяется не только их наличием на водосборе, но и их относительными размерами [101].

Учитывая особенности питания реки, выбирается метод гидрологического прогноза на различные по заблаговременности периоды. Выбор метода прогноза стока на вегетационный период или его месяцы основан на уравнении водного баланса речного бассейна [50]. Основная особенность его записи для горных водосборов в том, что его следует рассматривать по высотным зонам. Это связано с тем, что таяние снега в горах продолжается до нескольких месяцев при медленном продвижении тыла снеготаяния в высокогорные области. В то же время условия накопления и распределения снега по площади резко различается в зависимости от высоты.

В общем виде уравнение водного баланса для горных рек за весенне-летний период может быть представлено следующим образом [50]:

$$Y_0 = \sum_{i=1}^n S_i f_i + \sum_{i=1}^n X_1 i f_i + \sum_{i=1}^n X_2 i f_i + \sum_{i=1}^n h_T f_{ni} - \sum_{i=1}^n E_c i f_i - \sum_{i=1}^n E_n i f_i - \sum_{i=1}^n E_{д} f_i \pm \Delta_{эп} \pm \Delta_n \pm \Delta_B \quad (2.4)$$

где Y_0 - сток реки за период вегетации (включая базисный);

S_i - запас воды в снежном покрове i -й высотной зоны перед началом снеготаяния;

i - номер высотной зоны;

X_1 - количество осадков за время снеготаяния на поверхность снега;

X_2 - количество осадков от момента схода снега до окончания расчетного периода;

h_T - слой стаивания ледников и вечных снегов на площади, освободившейся от сезонного снега;

E_c - испарение со снега за вычетом конденсации ;

E_n - испарение с почвы;

$E_{д}$ - испарение влаги, задержанной кроной леса и транспирация;

f_i - площади высотных зон;

Δ_{ep} - изменение запаса грунтовых вод, расположенных выше слоев, обуславливающих базисный сток;

Δ_B - изменение запасов влаги, впитанной почвой и грунтами;

Δ_n - изменение запасов в слоях, обуславливающих базисный сток;

f_l - площади ледников и снежников.

Итак, в классическом виде для прогноза стока необходимо пользоваться воднобалансовым методом. Но, на момент составления прогноза многие члены уравнения измерить или получить путем расчета пока невозможно, поэтому при разработке практических методов прогноза сезонного стока его заменяют другим приближенным уравнением, в которое входят только основные факторы, полученные по данным измерений на стационарных метеостанциях и гидрологических постах [37, 38, 50]. Разрабатываемые таким образом методы прогнозов принято называть физико-статистическими [50].

Как правило, прогностические зависимости для горных рек имеют вид:

$$Q_t = f(S_t + X_1), Q_t = f(\sum X_m), Q_t = f(S_t, Q_m, \theta_m^o), \quad (2.5)$$

где Q_t - расход воды за период времени t ;

θ_m^o - температура за предшествующий период, продолжительность которого m ;

Q_m - расход воды за предшествующий период той же продолжительности m ;

S_t - запасы воды в снежном покрове к моменту составления прогноза t ;

X_m - осадки за период, предшествующий составлению прогноза.

Сам прогноз представлен либо графически, либо в виде уравнения регрессии. График линейной зависимости стока рек от описанных в уравнении (2) величин обладает наглядностью, можно проанализовать годы-аналоги, годы с максимальной и минимальной водностью, но требует индивидуального подхода к каждому конкретному расходу воды (случаю) на какой-то заданной реке. Зна-

чительно оперативнее составляется прогноз используя уравнение регрессии. Их общий вид следующий:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots \text{ и т.д.,} \quad (2.6)$$

где X - текущие значения наблюдаемых переменных;

Y - прогнозируемое значение переменной;

b - коэффициенты регрессии, рассчитанные по наблюдаемым значениям Y и X .

Этот метод основан на выявлении коэффициента корреляции, характеризующего тесноту линейной связи между двумя переменными Y и X при длине ряда n .

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}, \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2.7)$$

На стадии разработки этим методом обычно требуется большее количество данных наблюдений, чем это будет требоваться в дальнейшем. При разработке методик прогнозов для горных рек физико-статистическими методами требуется отбор станций и постов, которые затем будут использоваться при выпуске прогнозов. Его осуществляют эмпирически от степени тесноты зависимости между стоком и аргументом. При этом руководствуются следующими двумя правилами: во-первых, они должны входить в число информационных; во-вторых, они должны быть репрезентативными для достаточно большого района. Надежность прогноза может быть напрямую связана с количеством и пространственным распределением имеющихся данных и их взаимосвязанностью. Здесь необходима тщательность, чтобы обеспечить независимость дан-

ных, используемых для разработки и выпуска прогноза. Именно поэтому взаимосвязанность рядов данных так же, как и объем этих данных, весьма важна.

Для рек горных регионов в практике гидрологических прогнозов широко применяется метод использующий зависимость стока за период половодья (вегетации) от количества выпавших осадков как в твердом виде [37], так и осадков, взятых за календарный период [32-35, 37, 50]. Возможность использования осадков за календарный период с октября по март для рек Сырдарьинского бассейна описала Гирник Е. [33]. Для притока воды в Токтогульское водохранилище уравнение для прогноза стока на вегетационный период (апрель-сентябрь) имеет вид [50, 34]:

$$Q_{4..9} = aX_{10..3} + c \quad (2.8)$$

где $Q_{4..9}$ – средний вегетационный расход воды (за апрель-сентябрь)

$X_{10..3}$ – среднеарифметическое значение осадков по шести следующим станциям: Суусамыр, устье р.Тос, Ат-Башы, Арпа, Тянь-Шань и Тюя-Ашуу.

a, c - коэффициенты регрессии, рассчитанные по наблюдаемым значениям.

С закрытием метеостанций, входящих в прогностическую зависимость (2.8), стала использоваться информация о накоплении осадков за холодный период по данным станций Тянь-Шань, Нарын, Суусамыр, Ит-Агар, Баетово, Ат-Башы, Чаек. Коэффициент аппроксимации R^2 составил 0,66 ($S/\sigma - 0,58$).

Но этот метод не является надежным, т.к. не все осадки, выпавшие за этот период, формируют снеготзапасы, которые затем примут участие в стокообразовании. Во-первых, часто осадки в осенний период выпадают жидком виде и не вносят вклад в снеготзапасы. Во-вторых, не учитываются оттепели в зимние месяцы, когда снег частично стаивает и также не вносит вклад в снеготзапасы.

Использование множественной регрессии с двумя предикторами – расходом воды за предшествующий период (март или межень) и осадками, указанными в уравнении (2.8) улучшило качество прогноза стока на период вегетации

(апрель-май) [36]. Уравнение для расчета притока воды в Токтогульское водохранилище на вегетационный период имеет вид:

$$Q_{4..9} = aX_{10..3} + bQ_3 + c \quad (2.9)$$

Где $Q_{4..9}$ – средний вегетационный расход воды (за апрель-сентябрь);

$X_{10..3}$ – среднеарифметическое значение осадков по пяти станциям: Тянь-Шань, Нарын, Суусамыр, Ит-Агар, Баетово, Ат-Башы, Чаек;

Q_3 – расход воды за март;

a, b, c – коэффициенты регрессии, рассчитанные по наблюдаемым значениям.

Коэффициент аппроксимации R^2 , рассчитанный для уравнения (2.9) составил 0,75 ($S/\sigma - 0,50$) (Рис. 2.6).



Рис. 2.6. Зависимости для прогноза среднего вегетационного расхода воды, рассчитанные по уравнению 2.8 и 2.8.

Мы применили метод множественной регрессии с двумя предикторами – расходом воды за межень, суммой осадков за холодный период и, в некоторых уравнениях, с температурой воздуха для рек бассейна Амударьи Гунт и Варзоб (Памиро-Алай) и эффективность прогнозов на вегетационный период также улучшилась [97, 98].

В 70-ых годах были разработаны методы для прогноза стока рек на вегетационный период и период половодья, основанные на запасе воды в снеге [37], при этом устанавливаются корреляционные зависимости:

$$y = f [(s + x_1), x_2] \text{ и } y = f [(s + x_1), x_2, w] \quad (2.10)$$

где, y – сток за половодье;

s – запас воды в снежном покрове перед началом снеготаяния;

x_1 – количество осадков за время снеготаяния;

x_2 – количество осадков за время от схода снега в зоне до окончания половодья в расчетном створе на реке.

Для разработки методик прогноза средневегетационных расходов воды в качестве аргумента использовался наибольший запас воды в снеге, показатель снегозапасов определялся как средний слой воды в бассейне реки по данным маршрутных снегосъемок на конец марта [38, 37, с.191].

Разработка таких методик для рек со значительной долей ледникового питания являлась очень сложной задачей, т.к. для вычисления запаса воды в снежном покрове необходимо было проведение снегомерных маршрутных съемок на склонах различных экспозиций и крутизны. Зимой самые верхние зоны обычно были недоступны для измерений и применялся прием экстраполяции, не дающий действительных величин запаса воды в снеге [37, с. 261-274].

Также одним из источников получения информации о снегозапасах гор на различных высотных зонах и экспозициях склонов было проведение авиаоблетов и оценка высоты снега по установленным на основных снежниках Нарынского бассейна авиарейкам. Но и этот метод не является эффективным, т.к. в последние десятилетия большинство авиареек были уничтожены или повреждены. Нехватка средств на дорогостоящие авиаоблеты в высокогорных районах Нарынского бассейна не позволяет проводить регулярное наблюдение за состоянием накопившегося снежного покрова.

Таким образом, использование информации о снежном покрове со спутниковых данных значительно упрощает процесс получения информации о снегозапасах в горных территориях, в связи с чем, предметом исследования данной

диссертации явился метод, основанный на использовании данных о снежном покрове спутниковых изображений MODIS.

Спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) является одним из ключевых инструментов на борту американских спутников серии EOS Terra и Aqua. 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 со спутников Aqua и Terra. Спутники Terra и Aqua были запущены в 2000 году и, в данном исследовании, информация о снежном покрове со снимков MODIS Terra и Aqua была использована с 2000 по 2015 г.г.

2.3.3. Методика удаления облачности со спутниковых изображений для определения площади снежного покрова в бассейне реки

Для расчета площади снежного покрова бассейнов исследуемых рек применялась спутниковая информация снимков MODIS, обработанных в программе MODSNOW-Tool, позволяющей удалять облачный покров с исследуемого района [63]. В настоящее время в гидрометцентрах Кыргызстана, Казахстана, Таджикистана и Узбекистана установлено программное обеспечения MODSNOW-Tool [102], разработанное в рамках проекта CAWa (www.cawa-project.net), которое используется в оперативном режиме для мониторинга снежного покрова в горных регионах Центральной Азии. Программа имеет несколько модулей, которые в автоматическом режиме скачивают данные MODIS с сервера NSIDC (National Snow and Ice Data Center), соединяют и преобразуют оригинальные данные в формат GeoTIFF, выделяют водосбор и создают для него карты снежного покрова на текущую дату с удаленным облачным покровом. Точность удаления облаков в программе MODSNOW-Tool составляет 94% точ-

ность данных снежного покрова со спутниковых снимков MODIS в сравнении с наземными данными наблюдений за высотой снега составляют 93% для Центральной Азии [103].

MODIS, оптический датчик, установленный на борту спутников Terra и Aqua, проводит наблюдения с марта 2000 года и июля 2002 года, соответственно. MODSNOW-Tool использует ежедневную информацию MODIS Terra и Aqua (MOD10A и MYD10A, версия V005) с пространственным разрешением 500 м (Hall et al., 2006), полученной из «Центра данных National Snow and Ice» (NSIDC). Эти данные доступны с 2000 по 2020 год, со спутников Terra и Aqua и выпускаются на весь земной шар [104-106]. Снежный покров с данных MODIS может быть получен в формате данных HDF и располагается на сайте в градусной сетке размером 10^0 на 10^0 . Глобус покрыт 36 горизонтальными (h) и 18 вертикальными (V) линиями градусной сетки. Градусная сетка h22v04, h22v05, h23v04 и h23v05 полностью охватывают водосборы верховьев Амударьи и Сырдарьи в Центральной Азии. Эта схема организована в ручном, а также в автоматическом задании команды в определенное запланированное время.

Модули включают следующие этапы:

- (1) загрузка актуальных данных снежного покрова MODIS с сервера NSIDC;
- (2) загрузка текущей информации входящих и исходящих данных о коротковолновой радиации с сети автоматических климатических станций;
- (3) обработка данных о снежном покрове по данным метеостанций, используемых в дальнейшем в алгоритме расчетов удаления облачного покрова;
- (4) слияние и перепрограммирование требуемого объема нескольких квадратов градусной сетки с MODIS в виде файлов GeoTIFF;
- (5) преобразование файлов GeoTIFF в формат ASCII и выделение границ речных бассейнов;
- (6) непосредственно удаление облачного покрова с использованием восьми последовательных шагов;
- (7) заключительная обработка и визуализация отчетов о снежном покрове по выделенным речным бассейнам.

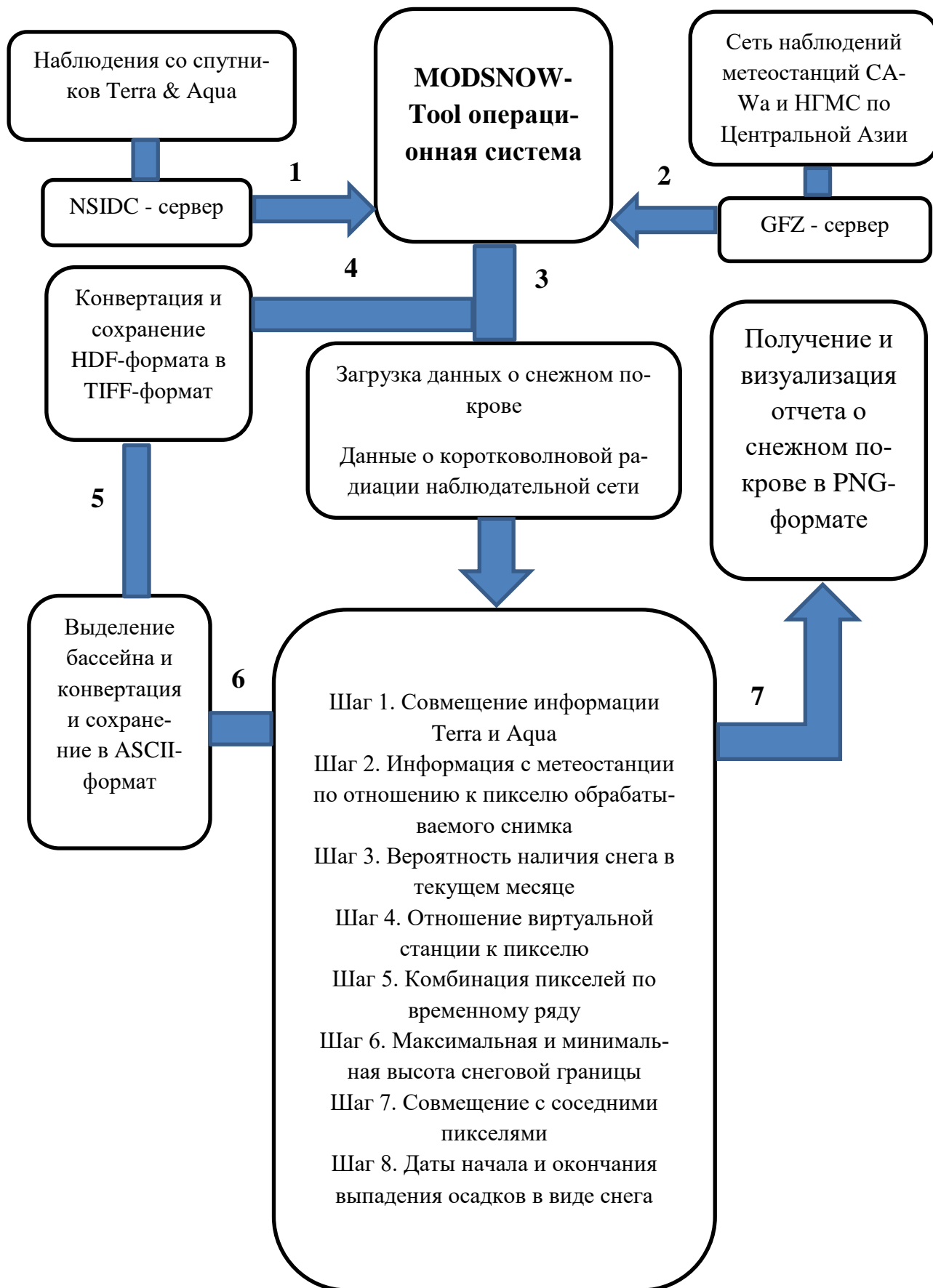


Рис. 2.7. Схема обработки данных снежного покрова в MODSNOW-Tool.

Схема обработки информации о снежном покрове программой MODSNOW-Tool, включающей семь модулей показана на рис. 2.7.

Модули 2 и 3 предназначены для выделения района Центральной Азии. Данные о коротковолновой радиации на метеостанциях используются для улучшения дешифрирования снежного покрова и основаны на выявленных между этими параметрами статистических зависимостях. Для Центральной Азии этот подход был использован из-за недоступности информации о высоте снежного покрова в рабочем режиме программы. Применение MODSNOW-Tool в других регионах возможно также с использованием информации о высоте снежного покрова в реальном масштабе времени.

В программе MODSNOW-Tool был реализован алгоритм устранения облачного покрова, основанный на работе А.А. Гафурова и Бардосси 2009г. с включением дополнительных новых шагов. В частности, в новом алгоритме используются точечные данные наблюдений за снежным покровом метеостанций для оценки наличия снежного покрова в отдаленных от них районах. Для этого были использованы пространственные статистические зависимости между состоянием пикселей (снег / без снега) и данные прокси-сервера. Записи и состояние других пикселей («Подход к пиксельной условной вероятности» и «Виртуальная станция к пикселю с условной вероятностью»). Наблюдаемые данные состояния снежного покрова (например, высота снега) на метеорологических станциях могут использоваться в качестве прокси-данных. Для оценки снежного покрова под облачным покровом используется расчет в алгоритме, состоящий из восьми шагов (рис.2.7).

С помощью программы MODSNOW-Tool, соискателем были обработаны ежедневные данные о площади снежного покрова бассейна реки Нарын до створа плотины Токтогульского каскада со снимков за период с 2000 по 2015гг. (Рис. 2.8).

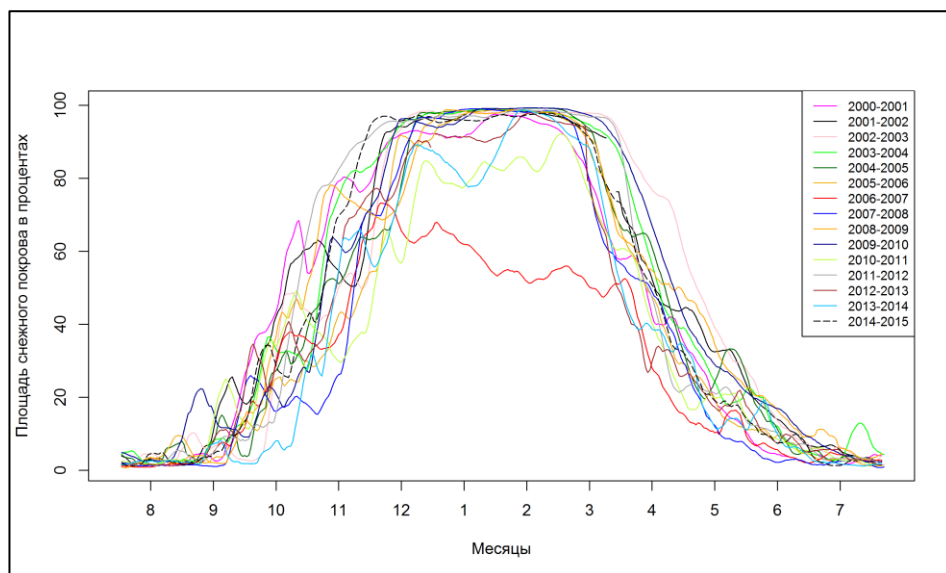


Рис. 2.8. Динамика снежного покрова за период с 2000 по 2015гг.

Для подбассейнов рек-притоков Нарынского бассейна площадь снежного покрова была рассчитана в программе ArcGIS и пакет программ Spatial Analyzed Tool. Для расчета площади снежного покрова использовалась следующая методика:

1. MODSNOW-Tool конвертирует изображения MODIS из формата ESRI в ASCII. Полученные изображения в ArcMap конвертировались затем из формата ASCII в растер.
2. Использовались подготовленные для рек Нарынского бассейна shp-файлы, которые обрабатывались в функции «извлечение».
3. «Извлеченный» таким образом подбассейн имеет свою собственную атрибутивную таблицу, в которой показываются два класса, определяемые на спутниковом изображении – снег и земная поверхность.
4. Получив эту информацию, вычисляется отношение класса снег к общей площади бассейна в процентах.

Использование в оперативном гидрологическом прогнозировании информации о снежном покрове со спутников MODIS, обработанных в программе MODSNOW-Tool, имеет ряд преимуществ. Географическая привязка снимка к территории, дешифрирование снимка и его классификация производится программой в автоматическом режиме.

2.3.4. Прогноз стока рек с использованием спутниковых снимков.

Учитывая влияние грунтового питания на сток рек Нарынского бассейна в период половодья, а также значительные талую снеговую и ледниковую составляющие, для расчета стока за вегетационный период и его месяцы мы использовали уравнения множественной линейной корреляции, рассчитанные в Excel [107]. В качестве аргументов были использованы расходы воды за предшествующий прогнозу месяц, предшествующий прогнозу и данные о площади снежного покрова со снимков MODIS за 2000-2015гг. Для суббассейнов со значительной ледниковой составляющей, зависящей от температуры воздуха в высокогорной зоне и ее аномалий, был использован дополнительный индикатор – температура воздуха за летний период. Уравнения для прогноза водности рек Нарынского бассейна и притока воды в Токтогульское водохранилище имеют следующий общий вид:

$$Q_t = aS_{sn} + bQ_{t-1} + c \quad (2.11)$$

$$Q_t = aS_{sn} + bQ_{t-1} + dT_{6-8} + c \quad (2.12)$$

$$Q_t = aS_{sn} + bQ_{t-1} + dT_{nd} + c \quad (2.13)$$

где Q_t – расход воды за прогнозируемый период;

Q_{t-1} – расход воды за месяц (декаду), предшествующий прогнозу;

S_{sn} – площадь снежного покрова (в %) по отношению к общей площади бассейна;

T_{6-8} – температура воздуха за летний период;

T_{nd} – дата перехода температуры воздуха через 0°C в сторону положительных температур (количество дней от 1 января).

a, b, c, d – коэффициенты регрессии, рассчитанные по наблюдаемым значениям.

Уравнение (2.11) использовалось нами для расчета стока на реках снего-ледникового питания, например, для нижнего течения реки Нарын (гидропост р.Нарын – с.Уч-Терек и, соответственно, притока в Токтогульское водохранилище), для рек Узун-Акмат и Чычкан. Уравнение (2.12) использовалось нами для рек ледниково-снегового питания, например, для верхнего течения реки Нарын (гидропост р.Нарын – г.Нарын). Здесь, температура воздуха за летний период является фактором, имеющим существенное значение при оценке интенсивности таяния ледников. Как правило, для рек высокогорных районов, имеющих среднюю высоту водосбора выше 3500 метров, аномальный режим температуры воздуха периода снеготаяния становится причиной низкой оправдаваемости гидрологических прогнозов. Для исследуемого региона были использованы данные о температуре воздуха по высокогорной метеостанции Тянь-Шань. В целях прогноза стока в конце апреля в оперативном режиме, для расчета по уравнению (2.12), использованы данные прогноза температуры воздуха для метеостанции Тянь-Шань. При отсутствии прогноза летней температуры воздуха, может использоваться уравнение (2.11).

Уравнение (2.13) использовалось нами для расчета расхода воды на месяцы сезонного снеготаяния (май, июнь), для которых даты начала снеготаяния на высокогорной метеостанции Тянь-Шань определяют начало таяния многолетних снегов и ледников. Использование этого предиктора улучшают качество методики прогноза стока рек.

Данные снежного покрова Spectroradiometer (MODIS) имеют пространственное временное разрешение 500 метров. Эти данные доступны с 2000 годов по настоящее время со спутников Terra и Aqua, соответственно и выпускаются на территорию всего земного шара. Данные снежного покрова MODIS представляют собой информацию о наличии или отсутствии снежного покрова, без информации о глубине или эквиваленте воды в нём. Недостатком продукта снежного покрова MODIS является дефицит данных, обусловленных наличием облачности на снимках. Поскольку MODIS является оптическим датчиком наблюдения за снежным покровом в условиях облачности невозможны. Чтобы

преодолеть это ограничение в данных о снежном покрове, ранее были разработаны несколько алгоритмов устранения облачного покрова.

Ежедневные данные снежного покрова MODIS являются ценной информацией для оценки водообеспеченности в горных районах. Однако обработка данных о снежном покрове спутниковых снимков MODIS не является прямой задачей конечных пользователей этих данных и требует специфических знаний по корректной обработке спутниковых изображений. Чтобы преодолеть это ограничение, а также и ограничения, связанные с облачным покровом, была разработана программа MODSNOW [85], которая удобна для пользователя и может использоваться для автоматической обработки данных снежного покрова MODIS, включая удаление облачного покрова (оценка фактического охвата пикселя под облачным покровом). Этот инструмент может быть установлен на локальном компьютере, который может обновлять ежедневное состояние снежного покрова заранее определенных бассейнов без какого-либо взаимодействия с пользователем. Для каждого из речных бассейнов полный временной цикл ежедневных данных о снежном покрове с 2000 по 2017 годы обрабатывается с использованием MODSNOW-Tool (пример бассейна р.Нарын на рисунке 2.9). Такие данные временных рядов дополнительно анализируются с временными рядами речного стока для каждого речного бассейна. Для этого был выполнен линейный регрессионный анализ.

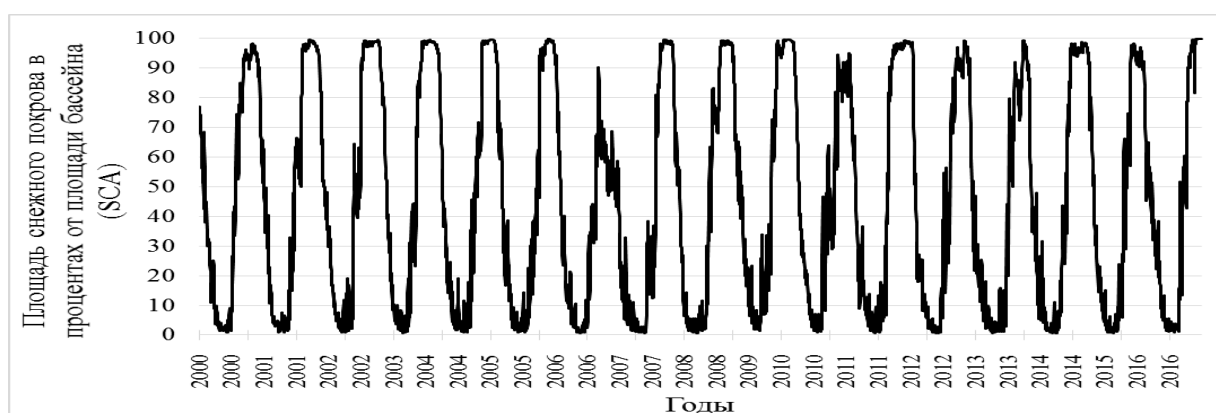


Рис. 2.9. Временные ряды суточной динамики снежного покрова для Нарынского бассейна в створе с.Уч-Терек с 2000 по 2016 гг.

Выделение площади водосбора и расчет площади снежного покрова со снимков MODIS производился с помощью инструментов ArcGIS [108].

Как показано на рисунке 2.9, гидрологический год 2006/2007 был самым малоснежным годом в бассейне. Следовательно, лето 2007 года было чрезвычайно засушливым, значение обеспеченности стока была значительно ниже нормы. Тем не менее, 2008 год также был одним из маловодных в Центральной Азии, хотя данные по снежному покрову указывают на «нормальный» снежный покров в бассейне. Однако это «нормальное» состояние снежного покрова не может быть оценено с использованием только данных SCA, так как продолжительность дней со снежным покровом в каждом бассейне также играет важную роль и может указать сумму накопленного снежного покрова. Чтобы рассмотреть пространственную и временную изменчивость снежного покрова в бассейне, мы вводим индекс снежного покрова (SCI), который представляет собой суммарную площадь снежного покрова для гидрологического года (уравнение 2.14).

$$SCI_t = \sum_{n=1}^{n=365/366} SCA_i \quad (2.14)$$

где SCI_t - индекс снежного покрова (Snow Cover Index) за год t ;

SCA_i – площадь снежного покрова (Snow Cover Area) для дней n , начиная с 1 сентября по 31 августа предстоящего года.

Уравнение 2.14 рассматривает степень покрытия снежного покрова и продолжительность залегания снега в гидрологическом году, и мы считаем его показателем для оценки снеготопливных запасов в целевом районе. Уравнением 2.14 оценивается степень покрытия снегом поверхности водосбора и продолжительность залегания снега в гидрологическом году. Оно принято нами в качестве показателя для оценки запасов снега в целевом районе.

Уравнение 2.14 было использовано нами при разработке методики прогноза стока рек бассейна Амударьи Кафирниган и Гунт (Памиро-Алай) на ме-

сяцы вегетационного периода, при этом полученные линейные уравнения могут использоваться для практического применения [110].

2.3.5. Оценка эффективности методики и оправдываемости прогнозов.

Верификация прогнозов определяет соответствие между рядом прогнозов и соответствующим рядом наблюдений. Никакую прогностическую систему нельзя считать полной без процедур верификации, выполняемых в административных и научных целях, а также в интересах пользователя. Для оценки успешности прогнозов могут быть вычислены различные статистические характеристики. Используемые статистики будут зависеть от типа прогноза, целей прогноза и проверок. Изучение эффективности предлагаемых показателей для эффективного описания успешности прогноза должно проводиться до осуществления программы верификации. Чтобы быть эффективной, система верификации должна включать архив прогнозов и данных наблюдений, по которым должны оцениваться прогнозы. Кроме того, для содействия интерпретации вычисленных показателей должен быть включен базовый прогноз. Выбор базового прогноза будет зависеть от типа проверяемого прогноза и процесса, используемого для разработки прогноза.

В системе Национальных гидрометслужб Центральной Азии принято рассчитывать качество полученной методики и допустимую погрешность прогноза [60].

Для оценки оправдываемости прогноза устанавливается допустимая погрешность прогноза, т.е. предельное значение погрешности при котором прогноз считается оправдавшимся. Прогноз считается оправдавшимся, если его погрешность равна или меньше допустимой погрешности прогноза. Допустимая погрешность прогноза для расхода воды принимается равной вероятному отклонению от нормы:

$$\delta = 0,674 * \bar{\sigma} \quad (2.15)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}} \quad (2.16)$$

где $\bar{\sigma}$ – среднее квадратичное отклонение предсказываемого расхода воды от нормы;

Q_i – расход воды в многолетнем ряду наблюдения;

\bar{Q} – норма, средний многолетний расход воды;

n – число членов многолетнего ряда.

Критерии качества методики прогнозов, а, следовательно, ее применимости, характеризуют надежность и эффективность методики.

Исходя из того, что распределение погрешностей прогнозов и распределение отклонений гидрологических величин от нормы близки к нормальному или отличаются незначительно, за критерий применимости и качества прогнозов принято отношение $\bar{S}/\bar{\sigma}$, где \bar{S} – средняя квадратичная погрешность поверочных прогнозов определяется по формуле [60]:

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Q - Q_i)^2}{n-2}} \quad (2.17)$$

где \bar{S} – средняя квадратичная погрешность поверочных прогнозов;

$\bar{\sigma}$ – среднее квадратичное отклонение предсказываемого расхода воды от нормы;

Q_i – расход воды в многолетнем ряду наблюдения;

Q – рассчитанный расход воды по тем же данным, на основании которых установлена сама корреляционная связь.

n – число членов многолетнего ряда.

Методика прогноза считается применимой для выпуска оперативных прогнозов при следующих отношениях $\bar{S}/\bar{\sigma}$:

$$\text{при } n \leq 15 \quad \bar{S}/\bar{\sigma} \leq 0.70; \quad (2.18)$$

$$\text{при } 15 < n < 25 \quad \bar{S}/\bar{\sigma} \leq 0.75; \quad (2.19)$$

$$\text{при } n \geq 25 \quad \bar{S}/\bar{\sigma} \leq 0.80. \quad (2.20)$$

где n – число членов ряда, использованного при установлении зависимостей прогноза, или число проверочных прогнозов.

Категория качества применимой методики и соответствующее ей значение $\bar{S}/\bar{\sigma}$ при числе проверочных прогнозов $n \geq 25$ указаны в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Категории качества применимой методики при соответствующем значении $\bar{S}/\bar{\sigma}$ и коэффициенте (или индексе) корреляции R^2 .

| Категории качества методики | Показатели качества методики | | |
|-----------------------------|------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| | $\bar{S}/\bar{\sigma}$ | R^2 | Обеспеченность допустимой погрешности |
| Хорошая | 0,05 – 0,5 | 1,00 - 0,87 | 82 - 100 |
| Удовлетворительная | 0,51 – 0,80 | 0,86 – 0,60 | 81 - 60 |
| Консультационная | > 0,80 | < 0,60 | Менее 60 |

Обеспеченность допустимой погрешности на вегетационный период для периода наблюдений с 2000 по 2015 годы определялась как отношение количества рассчитанных по предложенной методике расходов воды (точек) попавших в пределы допустимой погрешности прогноза к общему количеству точек за весь период наблюдений.

2.3.6. Статистическое моделирование в R-program.

Одной из программ, широко используемых в статистическом анализе различных рядов данных (метеорологических, гидрологических), является R-program с открытым кодом. Разработанная методика прогноза стока рек на вегетационный период в этом программном обеспечении дает хорошие результа-

ты и была предложена в практику оперативного гидрологического прогнозирования [110]. Установочные файлы в свободном доступе в интернете можно скачать по адресу <https://www.r-project.org/>. Интерфейс R открывается посредством программы R-Studio с открытым исходным кодом, доступным по адресу <https://www.rstudio.com/products/RStudio/>. Дополнительно устанавливаются пакеты `combinat`, `relaimpro` через программу R-Studio. Для оценки качества методики Хейко Аппель разработал в R-program скрипт «`LOOCV.R`» и «`autolinfit2.R`», позволяющий производить расчеты проверочных прогнозов [111].

Программа состоит из нескольких блоков [111]:

1. Загрузка исходных данных.
2. Установка режима работы программы (расчет моделей или прогноз на будущий период).
3. Расчет переменных по данным площади снежного покрова.
4. Расчет переменных по данным осадков.
5. Расчет переменных по данным температуры.
6. Расчет переменных предшествующего стока.
7. Расчет различных комбинаций предикторов из переменных 3-6 блоков со стоком на вегетационный период.
8. Подготовка линейных моделей из лучших по коэффициенту корреляции уравнений.
9. Вывод на монитор или печать лучших 20-и линейных моделей.
10. Расчет проверочных прогнозов (при необходимости).
11. Вывод на монитор или печать прогноза стока рек на вегетационный период.

В первом блоке – загрузке данных – подготавливаются данные о переменных в текстовом формате (.txt) и в программе определяется их месторасположение в конкретной директории на компьютере, с которой затем будет работать сама программа.

Во втором блоке устанавливается рабочий режим работы программы и период времени, за который будет подготовлено моделирование или прогноз.

В блоках 3-6 производится расчет переменных, используемых в качестве предикторов в регрессионных уравнениях, за различные периоды времени (январь-февраль, февраль-март и др.) и линейные корреляции со стоком за период вегетации. Результаты расчетов представляются графически и в табличном виде.

В седьмом блоке производятся расчеты различных комбинаций переменных и их корреляция со стоком. Создаются следующие составные предикторы:

- Модульный коэффициент снежного покрова с температурой за периоды март, январь-февраль, январь-март ("sc_temp")
- Модульный коэффициент снежного покрова с осадками за март, февраль-март, январь-март, ноябрь-февраль, ноябрь-март ("sc_precip")
- Модульный коэффициент температуры с осадками за январь, февраль, март, февраль-март, январь-февраль, январь-март, декабрь-март, ноябрь-март ("temp_precip")
- Модульный коэффициент снежного покрова с температурами и с осадками за март, февраль-март, январь-март ("sc_temp_precip").

Разработчик руководства по прогнозу водности рек в программе R-program (Хейко Аппель) считает выбор этой комбинации оптимальным для программы по времени, затрачиваемому на расчеты. Следующим шагом рассчитывается корреляция этих предикторов и их комбинаций со стоком за вегетационный период.

В восьмом блоке переменные объединяются во фрейм данных «regdata» и приводятся к единому формату для работы с автоматическим подбором лучших моделей в разделах 9 и 10, и группируются. Такие шаги необходимы для использования в модели только одного типа предикторов или композиций каждой группы. В одной модели может использоваться только одна переменная, например, площади снежного покрова или модульный коэффициент снежного покрова с температурой и т.д. Всем предикторам фрейма данных присваивается один групповой идентификатор с одинаковым числом для данных температуры воздуха или площади снежного покрова и т.д.

Девятый блок выдает результаты расчетов по линейным моделям, имеющим наиболее высокий коэффициент корреляции. В табличном виде представлены основные параметры расчетов линейных моделей:

- `n` -> Количество лучших моделей для запоминания базой данных программы. Нумерацию можно установить вручную, не обязательно использовать вариант выданный программой в автоматическом режиме.
- `no_vars_linmod` -> максимальное число предикторов, которые будут использоваться в модели прогнозирования. Должно быть минимум 1, и максимальное количество групп прогнозов 7. Чем больше значение «`no_vars_linmod`» установлено, тем дольше будет выполняться прогон модели. Это число также должно быть не слишком большим, чтобы избежать переобучения. Оптимальный вариант – 3-4.
- `fitmeas` -> критерий эффективности для выбора лучших моделей.

Используется один из показателей, который должен быть указан в двойных кавычках:

R^2 -> R-squared - коэффициент определения или дисперсия, или эффективность линейного уравнения (модели).

$AdjR^2$ -> скорректированный R-squared - R^2 на количество наблюдений и предикторов, используемых в уравнении (модели).

RMSE -> среднеквадратичная ошибка

MAE -> средняя абсолютная ошибка

SSQ -> сумма квадратов невязок

Оставшийся код этого раздела выполняет автоматическую подгонку модели и представляет лучшие `n` выбранных моделей в виде рисунка и таблицы. Кроме того, комбинации предикторов для моделей выводятся на консоль монитора.

Десятый блок имеет гибкую систему с использованием проверочных прогнозов, которые программа выполняет в автоматическом режиме. Программа удаляет несколько лет из статистической зависимости и показывает полученный результат – коэффициент корреляции, среднеквадратичную ошибку.

Специалист, использующий программу, может сравнить результаты качества и эффективности рассчитанных по проверочным прогнозам в девятом блоке моделей, и выбрать из них наиболее надежные. Разработанный Хайко Аппелем скрипт «LOOCV» производит расчеты критериев эффективности, попеременно убирая по одному году из линейных уравнений, для которого составляется и оценивается прогноз. Такой порядок сохраняется для всего ряда данных и, по окончании расчетов, вычисляется оправдываемость и эффективность (cv) прогнозов. В итоговой таблице добавляются колонки с расчетами критериев уравнений по проверочным годам. В колонке «loocv» оценивается надежность моделей, чем меньше разница между критериями линейного уравнения и критериями, рассчитанными по проверочным годам, тем более надежные модели (линейные уравнения) для прогнозирования. Наряду с таблицами, результаты представляются в графическом виде.

Одиннадцатый блок производит расчет непосредственно прогноза водности рек на вегетационный период по выбранному году. Прогнозирование выполняется с использованием моделей, разработанных в десятом блоке, проверенных на надежность в скрипте «LOOCV». В первом разделе должны быть внесены предикторы за период, предшествующий прогностическому. Вручную можно выбрать расчет прогноза по 5 или 20-и лучшим моделям, имеющие наиболее высокий коэффициент корреляции или, например, разный набор входящих в расчет аргументов в линейных зависимостях, отметив их согласно нумерации в таблице «LOOCV». Результат будет представлен в виде «коробчатого» графика, в котором будет отмечена медиана – рассчитанное среднее значение из моделей, с доверительным интервалом 20%, который можно изменить на 75 или 95% по выбору специалиста, составляющего прогноз.

2.3.7. Методика прогноза гидрологической засухи.

Как дополнительный метод, используемый в оценке экстремального накопления и выпадения осадков, участвующих в образовании стока рек, мож-

но использовать метод, разработанный в инструментах R-program Ларсом Герлицем для территории Центральной Азии [112]. В начале октября можно использовать методику определения зимне-весенних аномалий осадков. Методика основана на зависимости осадков в зимний и зимне-весенний период от влияния следующих факторов:

- Арктической и Северо-Атлантической осцилляции;
- Западного переноса воздушных масс;
- от мощности и площади снежного покрова, сформировавшегося в Высокой Сибири;
- Эль-Ниньо или Южной осцилляции;
- Температуры поверхности морей в прибрежной полосе;
- Муссонов.

Крупномасштабная атмосферная модель основана на учете региональных климатических условий и влияния граничных условий, таких, как температуры поверхности моря, почвенно-растительного покрова и влажности почвы и внешних факторов. Тот факт, что граничные условия характеризуется своей низкочастотной изменчивостью, приводит, по мнению Ларса Герлица, к определенной степени предсказуемости климатических условий во многих регионах мира.

Модель предсказания гидрологической засухи (аномалий осадков в зимне-весенний период) была применена для территории Кыргызстана и, в частности, для характеристики осадков Нарынского бассейна. Так как модель крупномасштабная, в качестве предикторов были использованы глобальные данные CRU, находящиеся в свободном доступе в интернете на сайте <http://www.cru.uea.ac.uk/data>. Глобальная база данных CRU использует данные температуры воздуха, осадков и индексов засухи, давления и индексов циркуляции с 1970г. по настоящее время. Набор данных привязан к градусной сетке с высоким разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ и основан на анализе 4000 записей отдельных метеостанций. Многие входные записи были гомогенизированы, но сам набор данных не является строго однородным.

Краткие выводы по главе 2

Орография Нарынского бассейна и значительные различия в высоте местности определяет его основные климатические особенности и разнообразие бассейна. В целом климат характеризуется суровостью, континентальностью и сухостью, можно отметить также, что летние осадки преобладают над зимними, а весной наблюдается усиление циклонической деятельности. Наиболее водоносные правобережные притоки реки Нарын, где бассейн открыт для северо-западного и западного переноса влагонесущих масс. Менее водоносны левобережные притоки.

Учитывая все разнообразие климатических условий Нарынского бассейна, соискатель пришел к выводу, что необходимо учитывать информацию об изменениях метеопараметров во всех частях Нарынского бассейна.

Для проведения анализа влияния различных климатических факторов на сток реки Нарын был выбран метод построения корреляционной матрицы, который позволяет выделить наиболее эффективные метеопараметры по вкладу в изменение стока реки Нарын.

Для оценки вклада в годовой сток основных источников питания (грунтового стока, талого снегового и ледникового) и их изменения использовался метод расчленения гидрографа.

Так как основным источником питания реки Нарын являются запасы сезонного снега в горах, информация об условиях накопления снега за холодный период времени является основным аргументом при разработке методик долгосрочного гидрологического прогнозирования. Для бассейна реки Нарын с его обширной территорией, широким высотным диапазоном и разнообразием климатических условий, наземных точечных данных о высоте снежного покрова и количестве осадков за холодный период редкой наблюдательной сети Кыргызгидромета недостаточно. Получение пространственной информации о площади снега в бассейне реки Нарын и на его основных притоках по данным

спутниковых снимков является надежным источником для оценки условий накопления снега.

Для составления методик долгосрочного прогноза водности реки использовались физико-статистические методы гидрологического прогнозирования и данные снимков MODIS, обработанных в программе MODSNOW (программа по удалению облачного покрова) и ArcGIS.

Учитывая влияние грунтового питания на сток рек Нарынского бассейна в период половодья, а также значительные талую снеговую и ледниковую составляющие, для расчета стока за вегетационный период и его месяцы мы использовали уравнения множественной линейной корреляции. В качестве аргументов в методиках были использованы расходы воды за предшествующий прогнозу месяц и данные о площади снежного покрова со снимков MODIS за 2000-2015 годы. Для подбассейнов со значительной ледниковой составляющей, зависящей от температуры воздуха и ее аномалий в высокогорной зоне, был использован дополнительный индикатор температура воздуха за летний период.

Кроме уравнений множественной линейной регрессии с перечисленными выше предикторами, мы использовали R-program с открытым кодом широко применяемых в статистическом анализе различных рядов метеорологических и гидрологических данных.

Как дополнительный метод, используемый в оценке экстремального количества осадков и определения зимне-весенних аномалий осадков в начале октября, мы использовали методику гидрологической засухи, разработанный в инструментах R-program для территории Нарынского бассейна.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА СТОК РЕКИ НАРЫН И ЕЕ ПРИТОКОВ.

3.1. Влияние метеопараметров на изменение стока рек Нарынского бассейна

С целью выявления особенностей многолетнего хода величины годового стока реки Нарын, была построена разностная интегральная кривая на основании данных Кыргызгидромета, на которой прослеживается два цикла изменения водности, как в верховье реки Нарын по данным гидропоста г.Нарын, так и в нижнем течении по створу с.Уч-Терек (Рис.3.1) [113, 114].

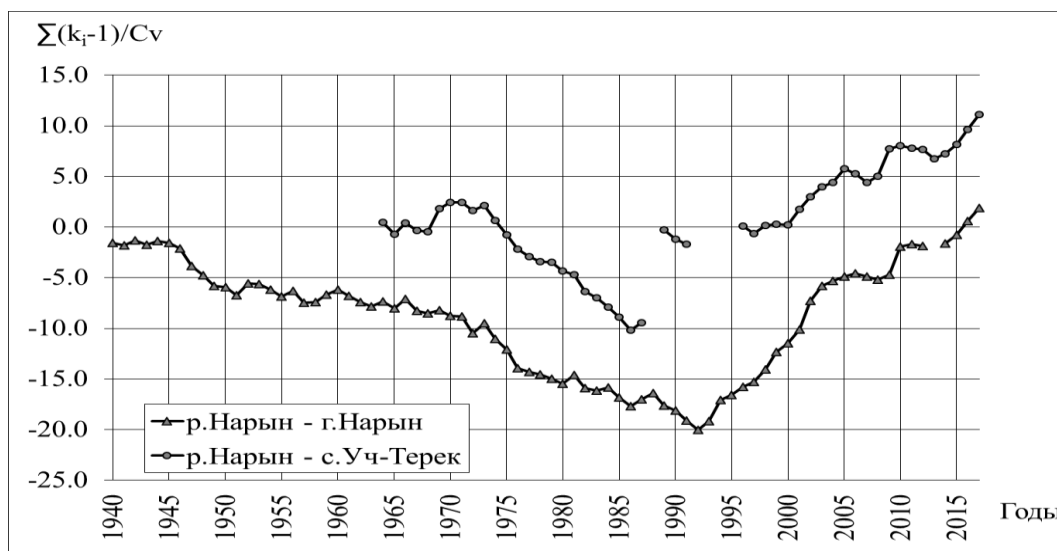


Рис. 3.1. Разностно-интегральная кривая среднегодовых расходов воды в верховье р.Нарын – г.Нарын (за период 1940-2017 гг.) и на р.Нарын – с.Уч-Терек (за период 1964-2017 гг.), составлен соискателем на основе данных Кыргызгидромета [25]

Период с 1939 по 1992г. характеризуется постепенным понижением водности, а с 1993 по 2015гг. – стабильным повышением водности.

Среднемноголетний расход воды на реке Нарын – г.Нарын за период с 1993 по 2015 гг. составил $106 \text{ м}^3/\text{с}$ или 121% от значений за период с 1939 по 1992 гг. ($87,1 \text{ м}^3/\text{с}$), по притоку в Токтогульское водохранилище расходы воды

за период с 1993 по 2015гг. составили 431 м³/с или 113% от значений за период с 1950 по 1992 гг. (382 м³/с).

Река Нарын в своем верхнем течении (г.Нарын) относится к ледниково-снеговому, а в нижнем – к снегово-ледниковому питанию и в период половодья имеет два пика водности, первый – в период таяния сезонного снега (апрель-июнь) и второй в период таяния ледников (июль-сентябрь) [4, 3, с.507-511]. На трендах, построенных по этим створам, выделяются годы с наибольшей водностью – 1994, 2002 и 2010 гг., т.е. годы с наибольшим накоплением осадков за холодный период времени (октябрь-апрель) (Рис. 3.2) [113, 114].

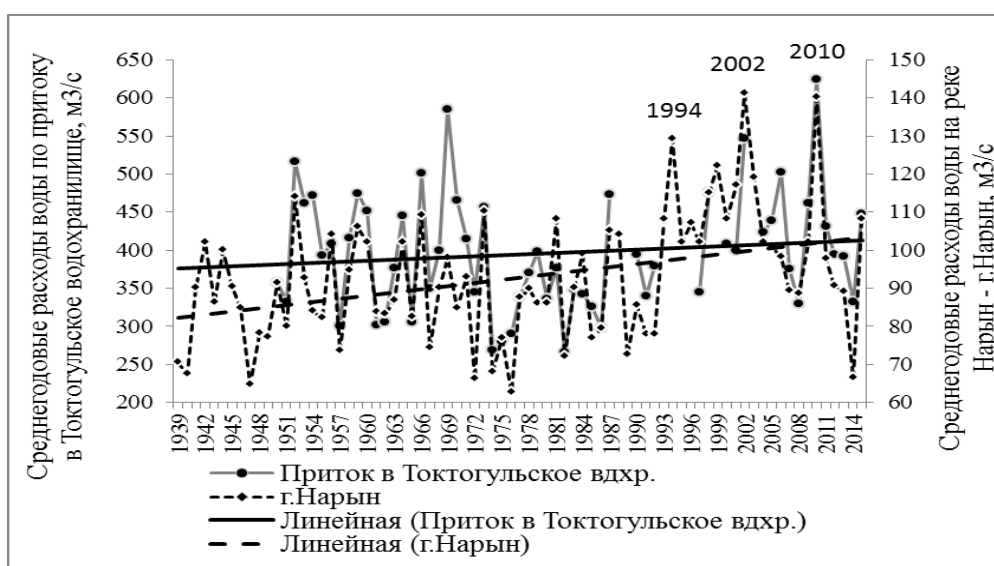


Рис. 3.2. Изменение среднегодовых расходов воды (м³/с) по притоку воды в Токтогульское водохранилище и в створе г.Нарын, составлен соискателем на основе данных Кыргызгидромета [25].

Для выявления тесноты зависимости среднегодового и среднего за вегетационный период стока реки Нарын с метеопараметрами была использована корреляционная матрица, составленная для верховьев реки Нарын и притока в Токтогульское водохранилище. В качестве аргументов были использованы данные о количестве осадков за холодный период (октябрь-апрель), температура воздуха за сезоны (зима, весна, лето, осень), даты перехода температуры воздуха через 0 °С в сторону положительных температур. Результаты расчета представлены в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1. Корреляционная матрица зависимостей между среднегодовыми расходами воды и метеопараметрами.

| Название метеопараметра | Название метеостанции | Коэффициенты корреляции с расходами воды по гидропостам | | |
|------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| | | р.Нарын-г.Нарын | р.Нарын - с.Уч-Терек | притоку в Токтогульское вдхр. |
| Осадки за холодный период октябрь-апрель | г.Нарын | 0,61 | 0,75 | 0,78 |
| | Ат-Баши | 0,51 | 0,61 | 0,63 |
| | Ит-Агар | 0,44 | 0,63 | 0,69 |
| | Чаек | 0,44 | 0,64 | 0,68 |
| | Баеково | 0,45 | 0,65 | 0,67 |
| Осадки за холодный период октябрь-апрель | Тюя-Ашуу | 0,48 | 0,58 | 0,63 |
| | Суусамыр | 0,26 | 0,52 | 0,60 |
| | Тянь-Шань | 0,54 | 0,60 | 0,61 |
| | Тянь-Шань с 2000 по 2015 гг. | 0,52 | 0,44 | 0,46 |
| | Сумма Нарын+Ат-Баши | 0,59 | - | - |
| | Сумма Нарын + Тянь-Шань с 2000 по 2015 гг. | 0,67 | - | - |
| | Сумма Нарын+Ат-Баши+ Ит-Агар+Чаек | - | 0,74 | 0,77 |
| Температура воздуха за зимний период | Нарын | 0,14 | -0,04 | 0,03 |
| | Ит-Агар | 0,23 | 0,16 | 0,18 |
| | Тянь-Шань с 2000 по 2015 гг. | 0,16 | 0,30 | 0,32 |
| Температура воздуха за весенний период | Нарын | -0,11 | -0,21 | -0,25 |
| | Ит-Агар | 0,04 | -0,09 | -0,12 |
| | Тянь-Шань с 2000 по 2015 гг. | -0,40 | -0,48 | -0,46 |
| Температура воздуха за летний период | Нарын | 0,13 | -0,17 | -0,16 |
| | Ит-Агар | -0,003 | -0,24 | -0,24 |
| | Тянь-Шань с 2000 по 2015 гг. | 0,30 | 0,18 | 0,18 |
| Температура воздуха за осенний период | Нарын | 0,37 | 0,23 | 0,21 |
| | Ит-Агар | 0,30 | 0,25 | 0,27 |
| | Тянь-Шань с 2000 по 2015 гг. | 0,17 | 0,41 | 0,39 |
| Переход температуры воздуха через 0°C | Тянь-Шань с 2000 по 2015 гг. | 0,62 | 0,73 | 0,73 |

Таблица 3.2. Корреляционная матрица зависимостей между средними вегетационными расходами воды и метеопараметрами.

| Название метеопараметра | Название метеостанции | Коэффициенты корреляции с расходами воды | |
|------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------|
| | | по р.Нарын - г.Нарын | по притоку в Токтогульское вдхр. |
| Осадки за холодный период октябрь-апрель | г.Нарын | 0,62 | 0,75 |
| | Ат-Баши | 0,53 | 0,62 |
| | Ит-Агар | 0,42 | 0,69 |
| | Чаек | 0,45 | 0,69 |
| | Баетово | 0,45 | 0,67 |
| | Тюя-Ашуу | 0,47 | 0,62 |
| | Суусамыр | 0,30 | 0,60 |
| | Тянь-Шань | 0,51 | 0,58 |
| | Тянь-Шань с 2000 по 2015 гг. | 0,51 | 0,44 |
| | Сумма Нарын+Ат-Баши | 0,60 | 0,73 |
| | Сумма Нарын + Тянь-Шань с 2000 по 2015 гг. | 0,64 | - |
| Температура воздуха за зимний период | Нарын | 0,12 | -0,04 |
| | Ит-Агар | 0,23 | 0,17 |
| | Тянь-Шань с 2000 по 2015 гг. | 0,17 | 0,32 |
| Температура воздуха за весенний период | Нарын | -0,13 | -0,31 |
| | Ит-Агар | 0,04 | -0,13 |
| | Тянь-Шань с 2000 по 2015 гг. | -0,40 | -0,44 |
| Температура воздуха за летний период | Нарын | 0,12 | -0,16 |
| | Ит-Агар | 0,0006 | -0,24 |
| | Тянь-Шань с 2000 по 2015 гг. | 0,35 | 0,20 |
| Температура воздуха за осенний период | Нарын | 0,34 | 0,18 |
| | Ит-Агар | 0,30 | 0,27 |
| | Тянь-Шань с 2000 по 2015 гг. | 0,23 | 0,39 |
| Переход температуры воздуха через 0°C | Тянь-Шань с 2000 по 2015 гг. | 0,60 | 0,73 |

Наибольший коэффициент корреляции – 0,60-0,78 – между среднегодовым (средневегетационным) стоком и метеопараметрами выявлен с осадками за холодный период времени, причем в нижнем течении реки Нарын (с.Уч-Терек и приток в Токтогульское водохранилище) связь с осадками наиболее тесная, в сравнении с верхним течением (г.Нарын) [113].

Коэффициенты корреляции с температурой воздуха за весенний и осенний периоды равны 0,30-0,48. Несколько меньше коэффициент корреляции 0,30-0,35 между стоком в верховье реки Нарын (г.Нарын) и температурой воздуха за летний период, вероятно из-за того, что от нее зависит интенсивность таяния ледников в высокогорной зоне. Между расходами воды в нижнем течении реки Нарын и температурой воздуха в зимний период корреляция характеризуется коэффициентами 0,30-0,32, что связано с влиянием зимних температур (суровости зимы) на условия снегонакопления [37, с.277].

Зависимость оказалась тесной между датами перехода температуры воздуха через 0°C в сторону положительных температур и стоком – 0,60-0,73. Однако такая связь была получена лишь с метеостанцией Тянь-Шань, данные же других метеостанций оказались не репрезентативными. Следует также отметить, что даты перехода температур через 0°C учитывались как количество дней с 1 января каждого текущего года и приходились на периоды с 26 апреля по 30 мая. Исследования зависимостей стока с мая по сентябрь от этого предиктора показали их достаточно высокий уровень: $R = 0,59$ (для верхнего течения) и $R = 0,73$ (для нижнего течения) [113].

Полученные результаты позволили провести анализ метеопараметров по репрезентативным станциям.

3.2. Повышение суммы осадков за холодный период

В целом по территории Кыргызстана годовая сумма осадков изменилась незначительно, но за последние годы произошли довольно резкие изменения в отдельных регионах, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения

количества осадков. Причем общая тенденция в последние годы направлена именно в сторону уменьшения. Так, за последние 20 лет наблюдается даже некоторая тенденция к уменьшению годовой суммы осадков на 1,868 мм/год [115]. Что касается осадков, то в целом по территории Кыргызстана в XX веке их количество в году увеличилось незначительно – на 23 мм или на 6%, а в верховьях реки Нарын они либо практически остались неизменными (МС Нарын), либо незначительно уменьшились (МС Тянь-Шань) [116].

На формирование стока реки Нарын наибольшее влияние оказывают осадки за холодный период времени (октябрь - апрель). Проведенный нами анализ данных о суммарном количестве осадков за холодный период года в бассейне реки Нарын показывает повышение значений на 5-12% за период с 1994 по 2015 гг. в сравнении с периодом с 1945 (1966г.) по 1993 г.г. [113, 114]. По данным метеостанции Тянь-Шань суммарное количество осадков за холодный период времени повысилось на 28%, однако это в большей степени связано со сменой ее местоположения и изменением мануальных измерений осадков на измерение на автоматической метеостанции на территории Кумтора (Рис. 3.3).

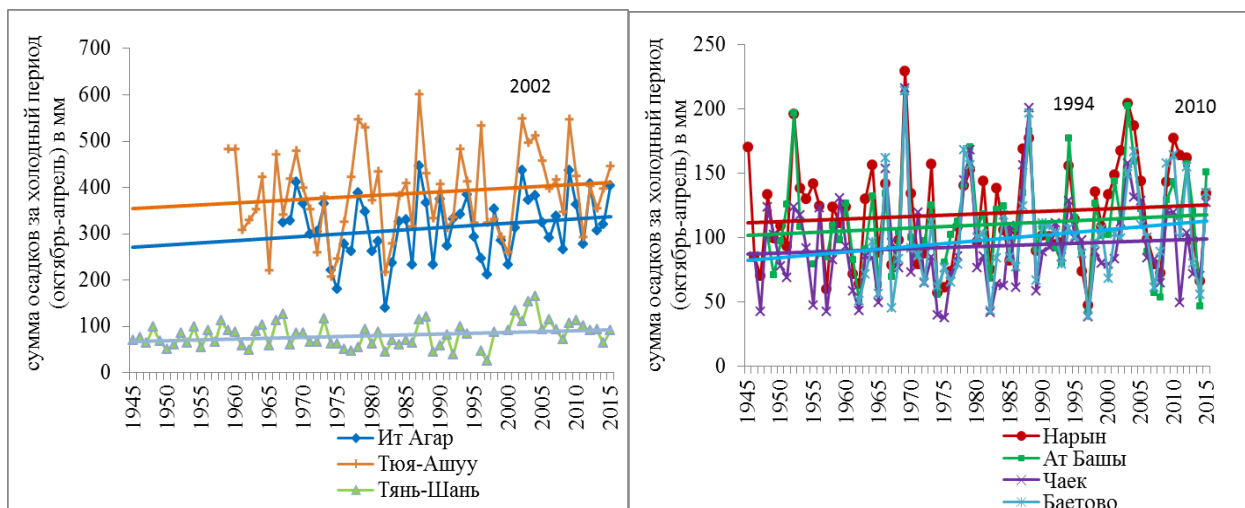


Рис. 3.3. Изменение суммы осадков за холодный период времени (октябрь-апрель) по данным метеостанций в бассейне реки Нарын, составлен соискателем на основе данных Кыргызгидромета [23].

По прогнозу исследователей, изучающих водные ресурсы Кыргызстана Д. М. Маматканова, Л.В. Бажановой, В.В. Романовского к 2020 г., ожидалось увеличение водности реки Нарын в створе г.Нарын на 15 % от среднемноголетнего стока за период 1939-1999 гг. и среднемноголетний сток за 1939-2020 гг. ожидался 102 м³/с [5, с. 168-176], фактически к 2015 году увеличение стока отмечалось лишь на 3% и среднемноголетний сток составил 92,8 м³/с за период 1939-2015 гг. По основному входящему створу в Токтогульское водохранилище (р.Нарын - с.Уч-Терек) ожидалось увеличение стока на 1,5 % от значений за среднемноголетний период 1964-1999 гг. или 337 м³/с за среднемноголетний период 1964-2020гг., фактически к 2015 году сток уже увеличился на 5 % и составил 341 м³/с за период наблюдений 1964-2015 гг.

К моменту составления прогноза в 2000 г. указанная группа исследователей располагала информацией о понижении количества осадков за холодный период. Тогда как с 2000 по 2015 гг. по данным метеостанций в Нарынском бассейне наблюдается устойчивая тенденция на повышение количества осадков за холодный период. Кроме того, была преувеличена интенсивность таяния ледников в высокогорной зоне верховьев реки Нарын, тогда как по данным исследователей – гляциологов Д.А. Петракова, И.И. Лаврентьева, Н.В. Коваленко и Р.А. Усубалиева скорость таяния ледников Внутреннего Тянь-Шаня в последние годы замедлилась [92].

Использование автором диссертационной работы данных наблюдений за последние пятнадцать лет уточняют изменения в стоке реки Нарын.

3.4. Изменение температуры воздуха за сезоны.

Нами проводился анализ метеопараметров по территории Кыргызстана, в том числе и для бассейна реки Нарын, за многолетний период наблюдений до 2016 года [116]. Он показал, что для территории Кыргызстана средняя годовая температура в XX веке в пересчете на 100 лет возросла на 1,6 °С, что значительно выше глобального потепления Земли, равного 0,75 °С. При этом,

наибольшее потепление наблюдалось зимой (2,6 °С), а наименьшее летом (1,2 °С). Для Нарына в январе оно достигало 5,2 °С.

Резко континентальный, засушливый климат частично сглаживает высокогорный рельеф, который способствует образованию облачности и осадков. Скорость изменения температуры в последние десятилетия существенно увеличилась. За период 1960–2010 гг. она составила 0,0248 °С/год, а за период 1990 – 2010 гг. она уже была 0,0701 °С/год. Практически одинаковое возрастание среднегодовой температуры наблюдается во всех климатических зонах и по всем высотам. Внутри года наибольшее повышение средней годовой температуры наблюдается в холодные месяцы [116].

Ниже на графиках представлены тренды температур воздуха за сезоны по данным трех метеостанций – Ит-Агар, Нарын (шкала на основных осях слева) и Тянь-Шань (шкала на вспомогательной оси справа) (Рис. 3.4).

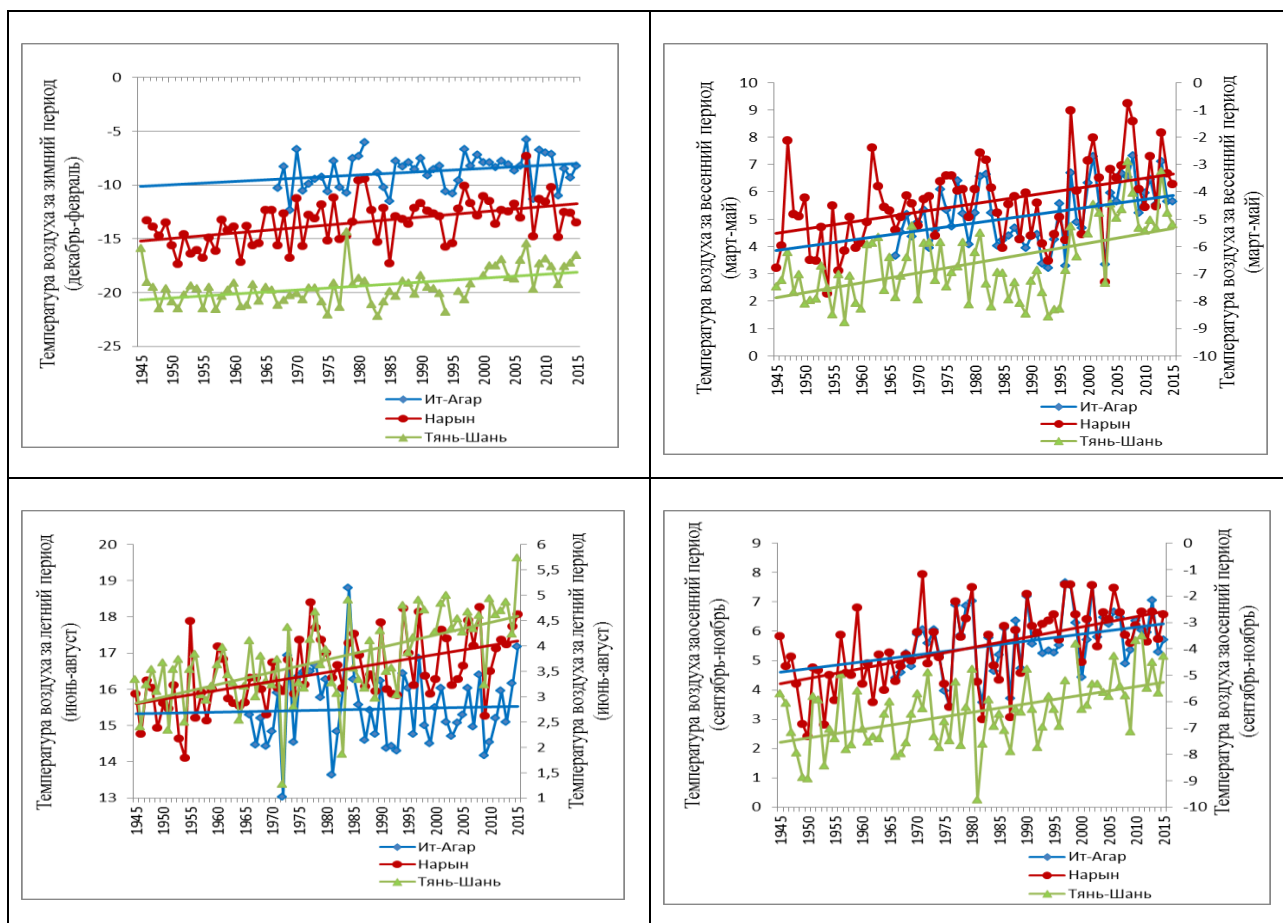


Рис.3.4. Изменение температуры воздуха по сезонам за период с 1945 по 2015 гг., составлен соискателем на основе данных Кыргызгидромета [23].

Нами был проведен анализ по данным наиболее репрезентативных метеостанций Ит-Агар и Нарын, по сравнению с периодом 1945 – 1978 гг. (1973, 1993, 1988 гг.) повышение температуры воздуха отмечалось [113, 114]:

- за зимний период с 1978 по 2015гг. на 1,3-1,9°C;
- в летний период – с 1973 по 2015гг. на 0,8-1,1°C;
- в весенний период – с 1993 по 2015гг. на 1-1,2°C;
- в осенний период – с 1988 по 2015гг. на 0,8-1,5°C.

К сожалению, в связи с переносом метеостанции Тянь-Шань, ряд наблюдений с 1945 г. прерывается в 1998г. и начинаются наблюдения на новом месте с 1999г., но даже на таком ряду данных, прослеживается тенденция на повышение температуры воздуха с 1999 по 2015гг.

3.5. Увеличение продолжительности теплого периода

Сумма положительных температур оказывает влияние на продолжительность периода половодья [2, 3]. Поэтому соискателем были рассчитаны суммы положительных температур и в результате мы пришли к выводу, что во все сезоны наблюдается повышение температуры воздуха, соответственно, теплый период и весна наступают раньше, а холодный период и зима – позже [113, 114]. Значительное влияние на изменение стока оказывает увеличение теплого периода, оказывающее влияние на таяние сезонного снега и ледников в горах. Так, по данным метеостанции Нарын, сумма положительных температур воздуха, рассчитанная как среднее по десятилетиям с 1945 по 2015гг., увеличилась с 2500 до 3000 градусов Цельсия за период с 1945 по 2015 гг. (Рис. 3.5). По данным метеостанции Нарын, которая имеет непрерывный ряд наблюдений, за период с 1945 по 2015гг., переход суточных температур воздуха через 0°C в сторону положительных температур происходит на 10 дней раньше, а в сторону отрицательных температур – на 15 дней позже (Рис.3.6) [113, 114].

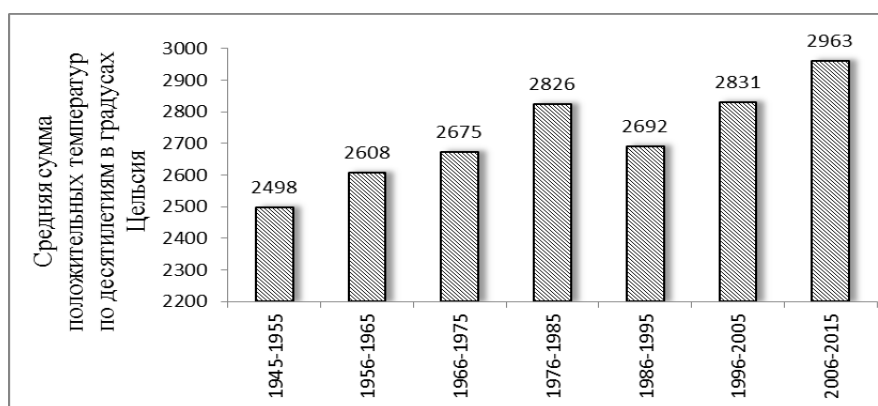


Рис.3.5. Изменение средней по десятилетиям суммы положительных температур воздуха по метеостанции Нарын с 1945 по 2015 гг., составлен соискателем на основе данных Кыргызгидромета [23].

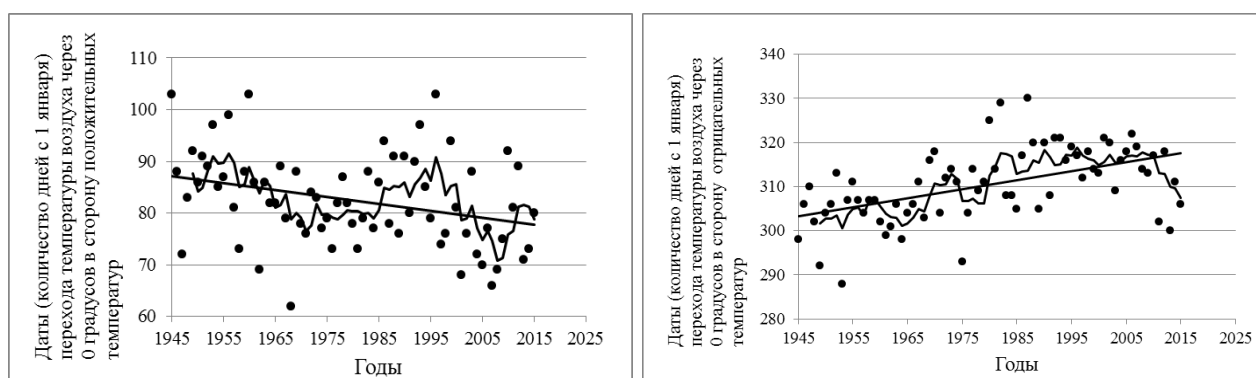


Рис.3.6. Переход температуры воздуха через 0°C в сторону положительных (слева) и отрицательных (справа) температур по данным МС Нарын, составлен соискателем на основе данных Кыргызгидромета [23].

Коэффициент корреляции между стоком реки Нарын и датой наступления положительных температур, т.е. перехода через 0 °С находятся в пределах 0,62-0,73 и учет этого фактора имеет большое значение для анализа изменения стока реки Нарын [113, 114].

3.6. Изменение водного режима и внутригодового распределения стока реки Нарын

Изменения температуры воздуха в совокупности с изменениями других характеристик климата оказывают влияние на интенсивность формирования стока, при высокой согласованности его внутригодового распределения [117].

Нами было выяснено, что увеличение продолжительности теплого периода влияет на внутригодовое распределение стока реки Нарын [113, 114]. Так, за период с 1994 по 2015 гг. в сравнении с периодом за 1939 (1950) -1993 гг., среднемесячные расходы воды оказались более высокими как в верховьях, так и в нижнем течении реки, изменилась, также, их доля во внутригодовом стоке. Как показано на рис. 3.7, среднемесячный сток в верховье реки Нарын за период 1994-2015 гг. в сравнении с периодом 1939-1993 гг. в весенние и осенние месяцы оказался выше, чем в летние месяцы и составил 120-140 %, тогда как в летние 113-114 %.

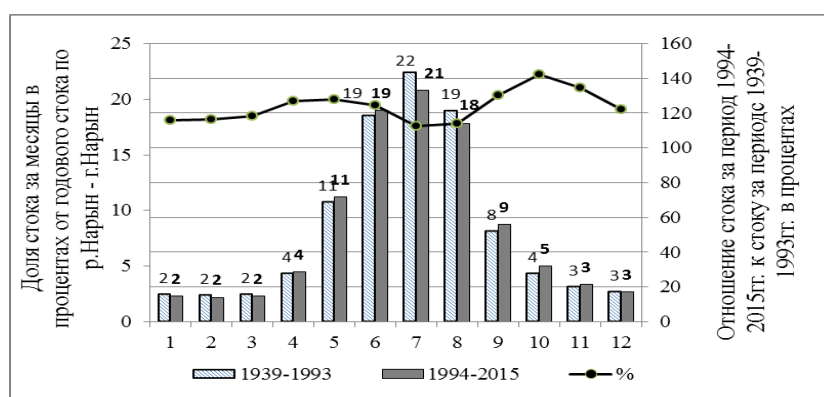


Рис. 3.7. Внутригодовое изменение стока за месяцы на реке Нарын – г.Нарын, составлен соискателем на основе данных Кыргызгидромета [23].

В нижнем течении реки Нарын влияние ледников на сток оказалось еще меньшим и сток за период 1994-2015 гг. в летние месяцы составил 100-110 % значений 1950-1993гг., а в весенние и осенние месяцы – 118-134 % (Рис. 3.8).

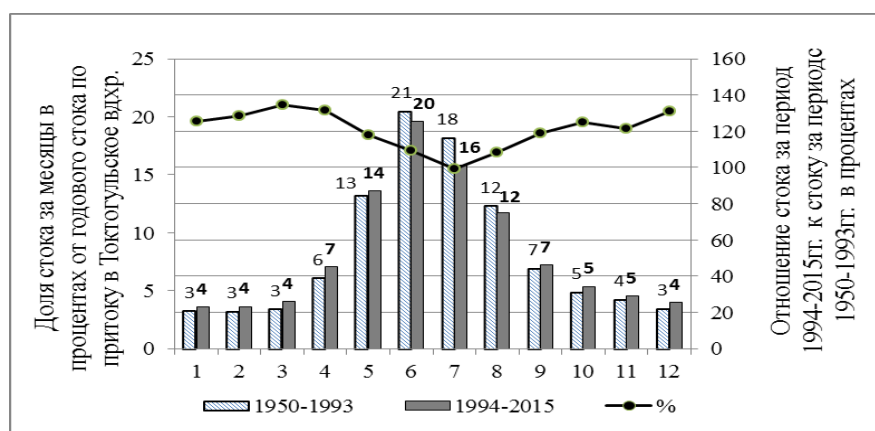


Рис. 3.8. Внутригодовое изменение стока за месяцы на реке Нарын – с.Уч-Терек, составлен соискателем на основе данных Кыргызгидромета [23].

Доля месяцев ледникового таяния (июль и август) в верховье реки Нарын понизилась на 1%, а в нижнем течении (июнь-август) – на 0,5-2%. Доля месяцев сезонного снеготаяния повысилась на 0,5-1% [113, 114].

При такой тенденции внутригодовой режим реки Нарын будет меняться, и следует ожидать, что пики паводков будут смещаться на более ранние сроки, а также будет меняться тип питания реки, как в верхнем, так и в нижнем течении. При этом, более значительную роль будет иметь сезонное снеготаяние.

3.7. Исследование основных компонентов стока реки Нарын.

Исследованием основных компонентов (составляющих) стока реки Нарын и ее источниками питания в различные годы занимались А.О. Кеммерих, О.П. Щеглова, В.Л. Шульц, А.Н. Диких, Л.В. Бажанова и другие.

Учитывая глобальное потепление с начала 1975-ых годов и деградацию оледенения в бассейне реки Нарын (см. главу 2), наиболее важное значение водные ресурсы имеют в летний засушливый период, когда сток реки формируется за счет талых ледниковых вод. По мнению А.Н. Диких, талые ледниковые воды реки Нарын компенсируют дефицит осадков в засушливые годы и обеспечивают сток, превышающий средние многолетние значения, если летняя температура воздуха выше нормы на 0,7 – 1,7 °С [118]. Сокращение площади оледенения, по прогнозам В.А. Кузьмиченка приведет к тому, что к концу 21-века сток реки Нарын уменьшится с 14 км³ до 9-7 км³. Ускоренная деградация ледников приведет к увеличению их водоотдачи и временному увеличению стока реки Нарын в 2018 – 2023 годах [96].

Нами было проведено исследование динамики основных компонентов стока методом расчленения гидрографа в верховьях реки Нарын за период изменения с 1992 по 2016 годы [119]. Для створа г.Нарын отношение стока рек за месяцы с преобладающим талым ледниковым питанием к стоку за месяцы с

преобладающим талым снеговым питанием составляет 1,40. Пик паводков формируется в июне-июле.

Повышение температуры воздуха в течение года сказывается на повышении стока как в месяцы ледникового, так и в месяцы сезонного снеготаяния. График расходов воды за период с 1940 по 2017 гг. показывает, что наблюдается устойчивая тенденция повышения водности в верховьях реки Нарын как в период март-июнь, так и в период июль-сентябрь (Рис. 3.9).

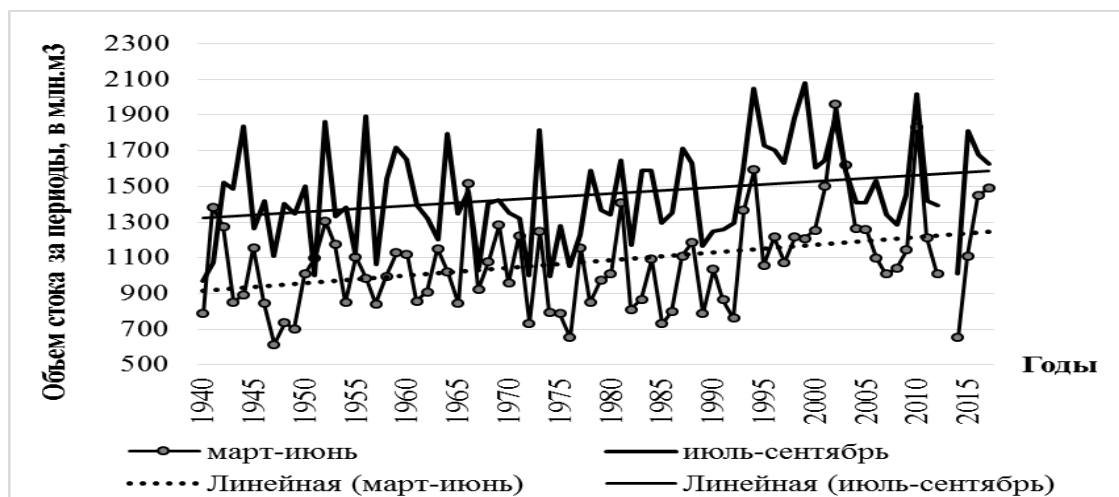


Рис. 3.9. Изменение расходов воды в верховьях реки Нарын в периоды март-июнь и июль-сентябрь за период наблюдений с 1940 по 2017 гг., составлен соискателем на основе данных Кыргызгидромета [23].

Проведенный анализ разностно-интегральной кривой показывает, что повышение среднегодовых расходов воды в верхнем течении реки Нарын в створе г.Нарын отмечается с 1993 года по настоящее время (см. рис. 3.1), что совпадает с периодом, который был определен в 2006 г. исследователями Д.М. Маматкановым, В.В. Романовским и Л.В. Бажановой [5].

Метод расчленения гидрографа для оценки изменения основных источников питания (грунтового, талого снегового и ледникового стока) был применен к последнему периоду стабильного повышения водности с 1993 по 2016 гг. Сравнительные графики расчленения гидрографов стока за 1992 и 2016 годы показаны на рис. 3.10.

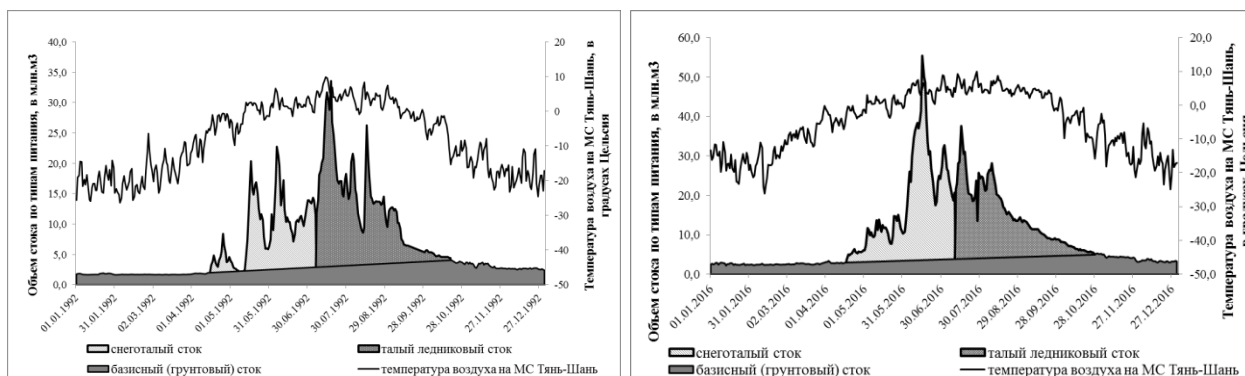


Рис. 3.10. График расчленения гидрографа по типам питания на р.Нарын– г.Нарын за 1992 г. (слева) и 2016 г. (справа)

В таблице 3.3 представлены результаты расчетов объемов стока от основных источников питания (в млн.м³) и в процентах от общего стока, даты начала и окончания периода таяния сезонного снега и ледников за эти годы.

Таблица 3.3. Объем стока основных источников питания и период таяния сезонного снега и ледников на р.Нарын– г.Нарын

| Годы | Объем стока основных источников питания | | | | | |
|------|-----------------------------------------|-----|----------------------|-----|-----------------------|-----|
| | Грунтовое питание | | Талый снеговой сток | | Талый ледниковый сток | |
| | в млн.м ³ | в % | в млн.м ³ | в % | в млн.м ³ | в % |
| 1992 | 969 | 39 | 562 (15.04-06.07) | 23 | 940 (7.07-19.10) | 38 |
| 2016 | 1290 | 35 | 1289 (17.04-09.07) | 35 | 1120(10.07-26.10) | 30 |

Анализ гидрографов стока показал, что начало половодья в верховьях реки Нарын, связанное с таянием сезонного снежного покрова, в 2016 г. и в 1992 г. началось в одни и те же даты в середине апреля и закончилось также в конце октября. Даты начала таяния ледников приходятся на 10 июля в 2016 г., что на 3 дня позже, чем в 1992 г. (7 июля).

Анализ изменения объема годового стока показал, что в 2016 г. он составил 150 % от значений 1992 года, по типам питания сток за счет таяния ледников составил 119 %, талого снегового стока – 230 %, грунтового стока – 133 % от значений 1992 г. (рис.3.11). Такие изменения связаны с более высокой температурой воздуха и сложившимися условиями накопления снеготалых вод в бас-

сейне реки Нарын. Так по данным метеостанции Нарын, сумма осадков за холодный период (октябрь-апрель) 2016 года превысила значения 1992 года в 1,5 раза.

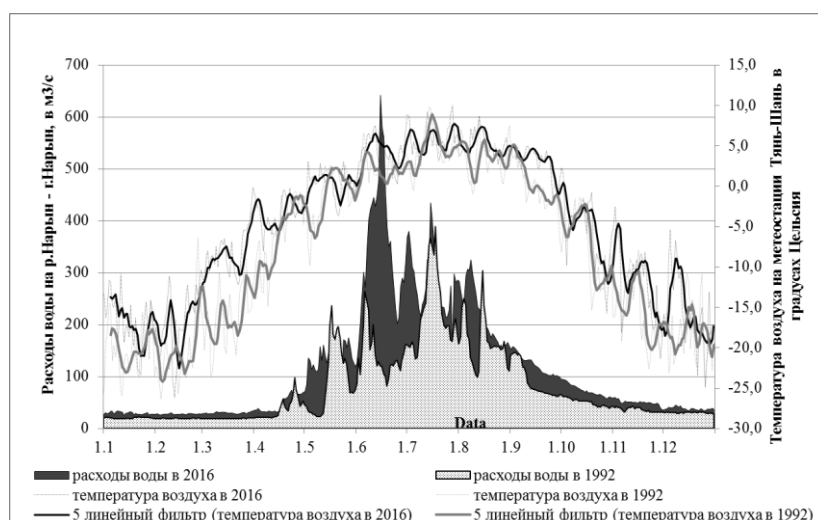


Рис. 3.11. Совмещенные гидрографы стока р.Нарын– г.Нарын и температуры воздуха на МС Тянь-Шань за 2016 г. и 1992 г.

Автор сравнил результаты расчетов с выводами предшествующих исследователей, проводивших эту работу в 1970-1999 и в 2015 гг. (таб. 3.4).

Таблица 3.4. Сравнение результатов вычисления основных компонентов стока другими исследователями.

| Авторы и годы, за которые проведены расчеты | Объем стока от разных источников питания | | | | | | |
|---------------------------------------------|------------------------------------------|-----|--------------------|-----|--------------------|------|--------------------------------------|
| | Грунтовое питание | | Талое снеговое | | Талое ледниковое | | Годовой сток в млн.м ³ |
| | млн.м ³ | в % | млн.м ³ | в % | млн.м ³ | в % | |
| О.Ю.Калашникова, 1992 [113] | 969 | 39 | 562 | 23 | 940 | 38 | 2470 |
| О.Ю. Калашникова, 2016 [113] | 1290 | 35 | 1289 | 35 | 1120 | 30 | 3700 |
| А.О.Кеммерих, 1972 [10] | - | 31 | - | 32 | - | 32 | - |
| А.Н. Диких, 1999 [20] | | | | | 787 | 28 | 2838 |
| В.Г. Коновалов, 1985 [17] | | | | | - | 34 | - |
| В.Г. Коновалов, 2015 [18] | | | | | - | 23,2 | 2800 |

А.О. Кеммерих использовал аналогичный метод расчленения гидрографа и его расчеты доли талого ледникового и снегового, а также грунтового стока в общем годовом стоке не противоречат расчетам соискателя за 2016 год [10]. Расчеты доли ледникового питания, проведенные А.Н. Диких и В.Г. Коноваловым, использовавших другие методы (по зависимостям с температурой воздуха и моделированию) [17, 20], также близки по значениям к расчетам соискателя, но по данным В.Г.Коновалова на 2015 г., доля ледникового стока составила 23,2 %, что на 7-15 % ниже [18].

Метод расчленения гидрографа был также нами применен для расчета компонентов стока в нижнем течении реки Нарын в створе с.Уч-Терек [120]. Отношение стока рек за месяцы преобладающего талого ледникового питания к стоку за месяцы преобладающего талого снегового питания в створе с.Уч-Терек составляет 0,87, пик паводков отмечается в июне. График хода расходов воды за период 1964-2017 гг. показывает, что наблюдается устойчивая тенденция повышения водности реки в период март-июнь и небольшая тенденция на повышение водности в период июль-сентябрь (рис. 3.12).

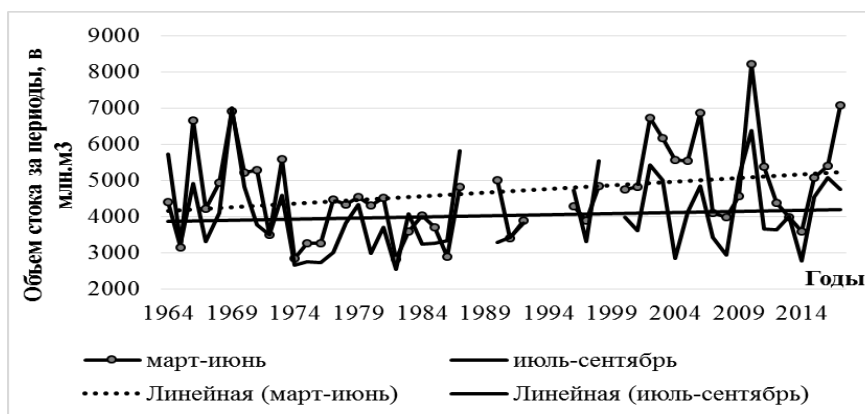


Рис. 3.12. Изменение расходов воды реки Нарын в период март-июнь и в период июль-сентябрь за период наблюдений с 1964 по 2017 гг.

В створе с.Уч-Терек, как и в створе г.Нарын, так и можно выделить два периода изменения среднегодовых расходов воды: 1964-1992 гг. – период понижения, 1993-2017 гг. – период повышения стока. Метод расчленения гидрографа для оценки изменения основных источников питания (грунтового, талого снегового и ледникового стока) был применен к последнему периоду стабиль-

ного повышения водности с 1993 по 2017 гг. Графики расчленения гидрографов стока за эти годы показаны на рис. 3.13.

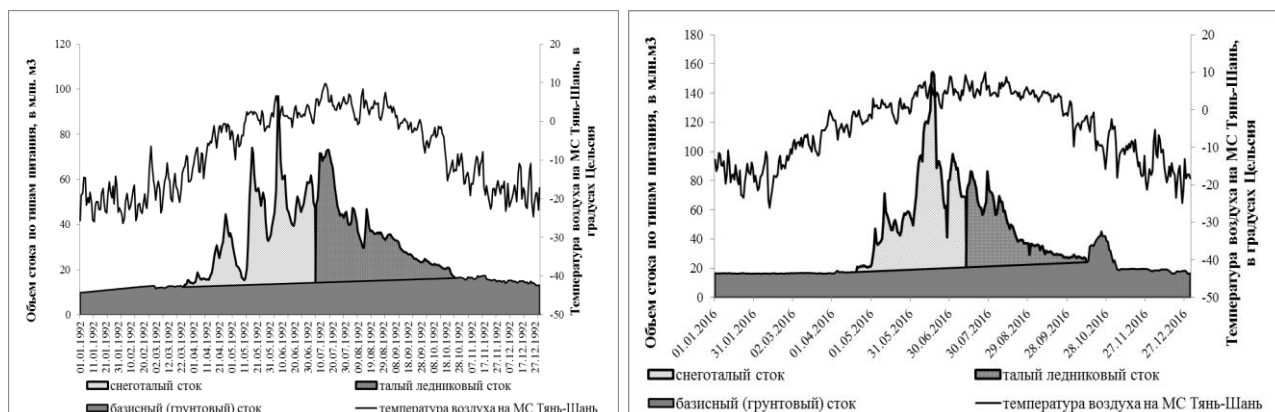


Рис. 3.13. График расчленения гидрографа по типам питания на р.Нарын за 1992 г. (слева) и 2016 г. (справа).

В таблице 3.5 представлены результаты расчетов доли стока по типам питания (в млн.м³) и в процентах от общего стока, даты начала и окончания периода таяния сезонного снега и ледников в 1992 и 2016 гг.

Таблица 3.5. Таблица 2. Объем стока основных источников питания и период таяния сезонного снега и ледников на р.Нарын – с.Уч-Терек

| Годы | Объем стока основных источников | | | | | |
|------|---------------------------------|-----|----------------------|-----|-----------------------|-----|
| | Грунтовое питание | | Талый снеговой сток | | Талый ледниковый сток | |
| | в млн.м ³ | в % | в млн.м ³ | в % | в млн.м ³ | в % |
| 1992 | 5091 | 51 | 2536 (24.03-06.07) | 26 | 2311 (07.07-25.10) | 23 |
| 2016 | 7297 | 54 | 3954 (17.04-11.07) | 30 | 2120 (12.07-06.11) | 16 |

Анализ гидрографов стока показал, что половодье на реке Нарын в 2016г. по сравнению с 1992 г. началось почти на месяц (на 25 дней) позже и закончилось на 12 дней позже. С 2010 г. по настоящее время, из-за ввода в эксплуатацию каскадов ГЭС Камбараты-2, находящихся выше гидропоста Уч-Терек, суточный ход гидрографа реки Нарын имеет небольшие колебания, поэтому анализ дат начала половодья и окончания половодья затруднен. Так, например, на гидрографе реки в октябре 2016г. наблюдается скачок водности, тогда как при

естественном стоке таких подъемов на реке в период октябрь - февраль не наблюдается (рис. 3.13 (справа)). Однако, в течение года объем стока выравнивается, т.к. объем воды в водохранилище Камбарата-2 небольшой (70 млн.м³) и речной поток в основном проходит транзитом.

Даты начала таяния ледников приходятся на 12 июля в 2016 г., т.е. на 5 дней позже по сравнению с 1992 г. (7 июля). Анализ изменения составляющих по типам питания показал, что в 2016 г. годовой объем стока составил 135 % от значений 1992 года, при этом объем стока за счет таяния ледников составил 92 %, талого снегового стока – 156 %, грунтового стока – 143 % от значений 1992 года. Такие изменения, как и в створе г. Нарын, связаны с более высокой температурой воздуха и накоплением снега в бассейне реки Нарын превысившего в 1,5 раза значения 1992 г. (рис. 3.14).

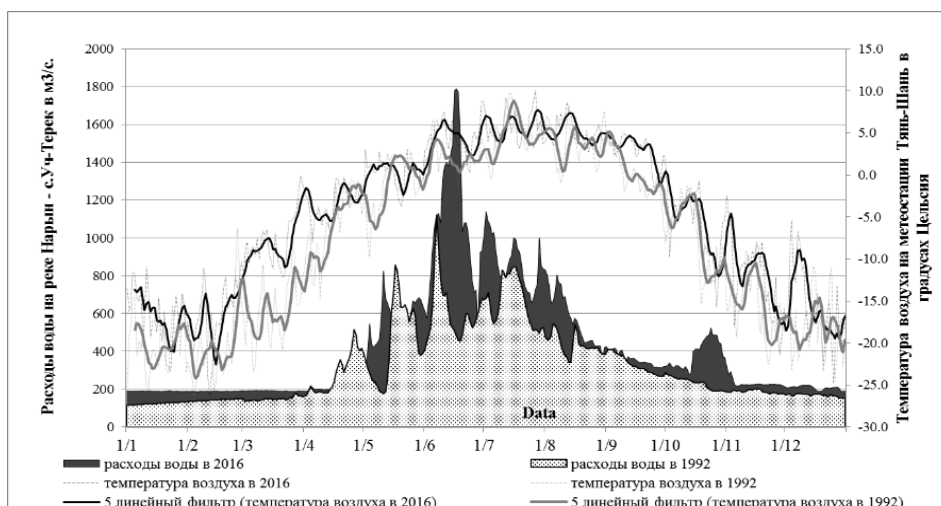


Рис. 3.14. Совмещенные гидрографы стока р.Нарын и температуры воздуха на МС Тянь-Шань за 2016г. и 1992г.

Однако стоит отметить, что гидрограф стока реки Нарын в створе с.Уч-Терек в 2016 г. был многомодальный. За 2016 г. был проведен анализ метеопараметров: суточного хода изменения площади снежного покрова (в процентах от площади бассейна) в бассейне реки Нарын по данным спутниковых снимков MODIS, температуры воздуха и количества осадков по данным метеостанции Тянь-Шань (рис. 3.15).

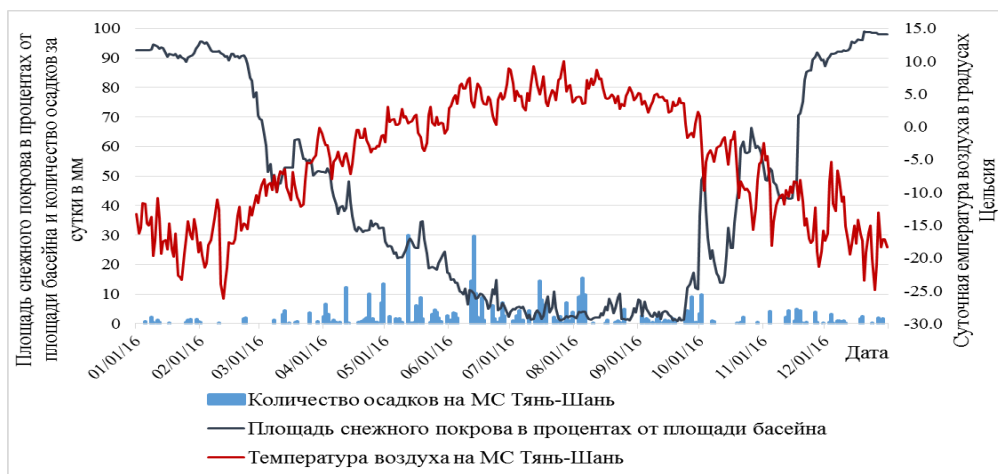


Рис. 3.15. Суточный ход изменения площади снежного покрова по данным снимков MODIS, температуры воздуха и количества осадков на МС Тянь-Шань.

Помимо того, что температура воздуха в июле и августе сохранялась высокой, в течение всего летнего периода отмечалось выпадение осадков, что способствовало как увеличению снежного покрова в высокогорьях, так и дополнительному увеличению стока за счет дождевого питания (рис. 3.16).

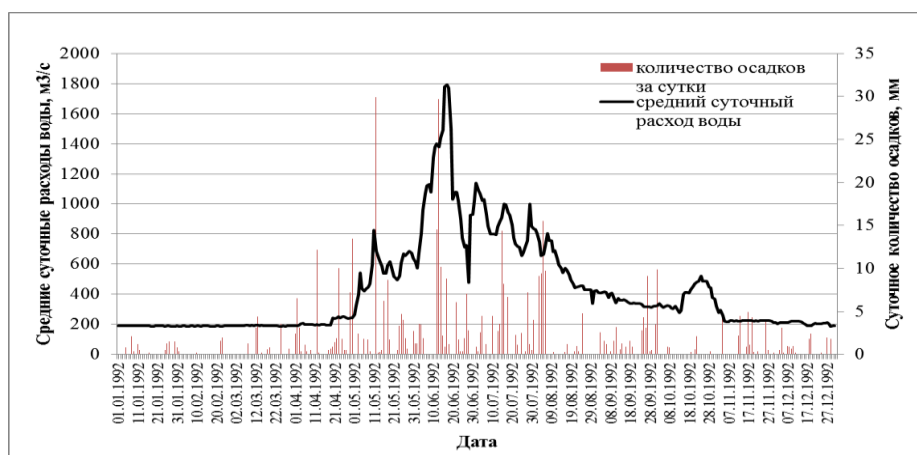


Рис. 3.16. Совмещенный гидрограф стока реки Нарын в створе Уч-Терек с количеством осадков на метеостанции Тянь-Шань за 2016 год.

Анализ метеопараметров позволяет сделать вывод, что при выпадении осадков с 1 июля по 23 сентября, площадь снежного покрова в высокогорной зоне увеличивалась до 5,4-11 %, тогда как в дни без осадков она составляла 1,1-2,3 % от площади бассейна. По данным исследователей-гляциологов А.Н. Диких, А.Г. Шабунина и других [20, 90], площадь оледенения в бассейне реки

Нарын составляет около 2-ух процентов от общей площади бассейна, что указывает на определение доли ледникового питания в бассейне реки Нарын как преобладающей, но не точной. И в питании реки в период с июля по сентябрь участвуют как ледники, так и талый снеговой сток. Поэтому выбор даты начала таяния ледников и расчет объема ледникового стока за 2016 год были затруднены. Отсутствие же полного ряда наблюдений за расходами воды на реке Нарын в последние годы не позволяло выбрать другие менее сложные для расчетов объемов стока варианты.

Сравнение результатов вычисления основных компонентов стока другими исследователями представлено в таблице 3.6.

Таблица 3.6. Сравнение результатов вычисления основных компонентов стока другими исследователями.

| Авторы и годы, за которые проведены расчеты | Объем стока от разных источников питания | | | | | | |
|---------------------------------------------|------------------------------------------|-----|----------------------|-----|-----------------------|------|--------------------------------------|
| | грунтовое питание | | Талый снеговой сток | | Талый ледниковый сток | | Годовой сток в млн.м ³ |
| | в млн.м ³ | в % | в млн.м ³ | в % | в млн.м ³ | в % | |
| О.Ю.Калашникова, 1992 [114] | 5091 | 51 | 2536 | 26 | 2311 | 23 | 9937 |
| О.Ю. Калашникова, 2016 [114] | 7297 | 54 | 3954 | 30 | 2120 | 16 | 13371 |
| З.В. Джорджио, 1955 [26] | - | 44 | | | | | - |
| М.И. Львович, 1938 [9] | - | 21 | - | 36 | - | 43 | - |
| **О.П. Щеглова, 1960 [2] | - | 44 | - | 42 | 1261 | 10,3 | 12268 |
| *А.Н. Диких, 1999 [20] | - | | - | | 1244,5 | 9,1 | 13624 |
| В.Г. Коновалов, 2015 [18] | - | | - | | | 5,6 | 11500 |

Примечание: * - расчеты были выполнены для реки Нарын в створе с.Уч-Курган, находящегося ниже с.Уч-Терек; ** - расчеты были выполнены для реки

Нарын в створе с.Уч-Курган, находящегося ниже с.Уч-Терек, и до строительства Токтогульского водохранилища.

О.П. Щеглова рассчитывала ледниковый сток реки Нарын по «термическому году», который она определяла по формуле, в которую входили значения суммы среднесуточных положительных температур [2]. А.Н.Диких также использовал в своих вычислениях зависимости ледникового стока от температуры воздуха. Результаты их расчетов доли ледникового стока в годовом стоке реки Нарын были в 1,5 – 2 раза ниже значений автора [20]. Наибольшие вычисления доли ледникового питания, 43 % от годового стока, оказались у М.И.Львовича, который их проводил методом расчленения гидрографа [9]. Вычисления, проведенные автором тем же методом, показали другой результат – 14-17%. Доля грунтового питания, согласно расчетам соискателя составила 51-54 % от годового стока, что на 7-10% выше расчетов выше расчетов О.П.Щегловой и З.В. Джорджио [2, 26] и на 30-33 % выше расчетов М.И. Львовича [9].

По мнению современных исследователей, А.А. Савельева и И.В. Токарева, работавших над созданием воднобалансовой модели реки Нарын, подземное питание полностью определяет поверхностный сток реки Нарын, а роль ледникового питания в стоке реки незначительна. Также они определили, что статистически значимое увеличение зимнего стока с 1979 года с фактором 1,02 в год связано с глобальным потеплением. Они пришли к выводу, что подземный сток в рыхлых подрусловых и склоновых отложениях определяет задержку максимума поверхностного стока на 1,5-2 месяца по отношению к пику снеготаяния [121].

А.А. Ильясов в 1950-ых годах оценил расход подруслового потока между устьями рек Кекжерты и Кекирим в 1/3 от поверхностного стока. В Суусамырской, Ат-Башинской и некоторых других межгорных впадинах происходит выклинивание на поверхность грунтовых вод и образуются сазовые болота, а грунтовые воды межгорных впадин Внутреннего Тянь-Шаня, наоборот, бедны и находятся на большой глубине [68].

Сравнение полученных результатов расчета основных компонентов стока реки Нарын по методу генетического вертикального расчленения гидрографа с результатами других исследователей, которые производили расчеты стока с использованием моделирования и установленных зависимостей с температурой воздуха, показало его эффективную применимость для верховьев реки Нарын, где площадь бассейна составляет 10,5 тыс. км². Для всего бассейна реки Нарын до створа с.Уч-Терек с площадью 58,0 тыс. км², этот метод не эффективен, т.к. различный уровень залегания грунтовых вод в бассейне реки, различная степень оледенения в верховьях основных притоков, не дают достоверной оценки в первую очередь ледникового, а также талого снегового и, зависящего от них, грунтового питания реки. Оценка основных компонентов стока на основных притоках реки Нарын (Ат-Башы, Алабуга, Суусамыр и других) могла бы дать хорошие результаты, но отсутствие информации о фактических суточных расходах воды на основных притоках реки, в связи с закрытием на них гидропостов в 1990-ых годах, не позволяет провести такие исследования.

Следует также отметить, что введение в эксплуатацию каскадов ГЭС Камбараты-2 вносит изменения с суточный ход гидрографа стока реки Нарын в створе Уч-Терек с 2010 г. по настоящее время, но в течение года, объем стока реки выравнивается, что позволяет проводить расчеты естественных объемов стока по типам питания за год.

В диссертационной работе не проводились расчеты дождевого питания реки Нарын, т.к. О.П. Щеговой была дана подробная характеристика дождевого питания и по ее расчетам его доля составляет не более 4% от годового стока.

3.7. Влияние на сток рек продолжительности залегания и максимальной высоты снежного покрова

Одним из наиболее важных факторов, оказывающих непосредственное и наибольшее влияние на сток, является снежный покров. Нами был проведен анализ данных по снежному покрову за последние 15 лет (2000 – 2015 годы) по

постоянным рейкам на метеостанциях Нарынского бассейна, который показывает его основные особенности [122]. Годы с наибольшими значениями высоты и продолжительности залегания снежного покрова (многоснежные) соответствуют многоводным годам, и, наоборот, годы с наименьшими значениями высоты и продолжительности залегания снежного покрова (малоснежные) – маловодным годам (рис. 3.17).

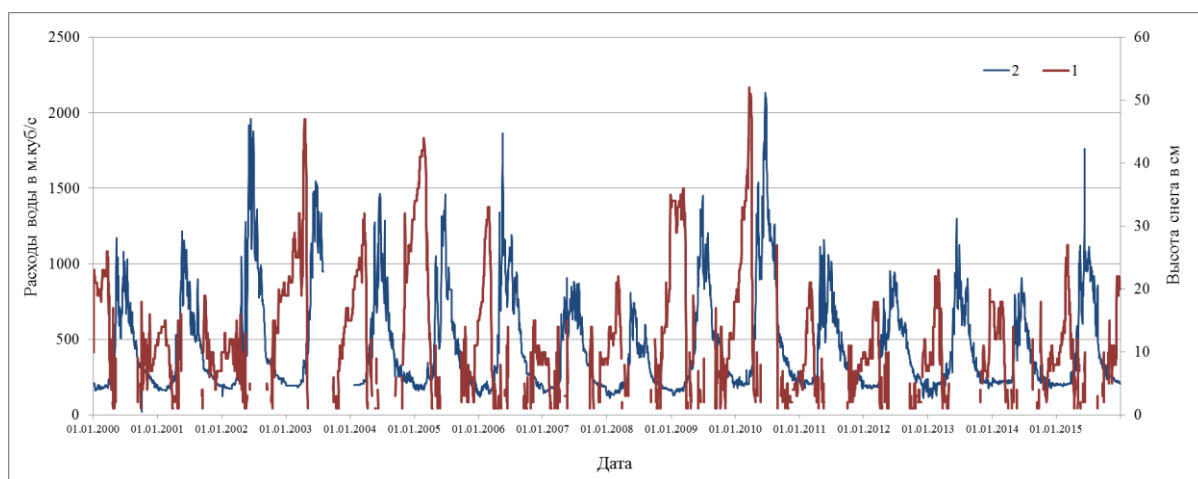


Рис. 4. График совмещенных данных суточного хода высоты снега на метеостанции Тянь-Шань (1) и гидрографа стока реки Нарын (2).

Так, максимальное число дней со снежным покровом наблюдалось в 2002 году на высокогорных метеостанциях Тянь-Шань и Тюя-Ашуу – 253 и 277 дней и на метеостанции Суусамыр – 166 дней. На метеостанциях Чаек, Нарын и Ит-Агар максимальное число дней со снежным покровом отмечалась в 2012 году - 128, 144 и 155 дней, соответственно на Ит-Агаре в 2003 году - 156 дней.

Максимальная высота снежного покрова за период сентябрь-июнь с 2000 по 2015гг. наблюдалась в 2003 году на метеостанциях Тюя-Ашуу и Нарын 195 и 49 см, тогда как в 2010 году на метеостанциях Тянь-Шань и Чаек она составила, соответственно, 52 и 43 см, а на метеостанции Нарын – 48 см; в 2012 году на метеостанции Ит-Агар 108 см, а на метеостанции Суусамыр в 2015г - 71 см. В целом, можно выделить несколько ясно выраженных периодов парных лет, когда снежный покров имел максимальные значения высоты, такие как – 2002 и 2003, 2010 и 2012 годы. Выделяются также годы с наименьшим числом дней со

снежным покровом – 2007, 2013 и 2014. Те же годы, соответственно, являются многоводными и маловодными на реке Нарын и её притоках.

Для выявления репрезентативных станций, имеющих высокую тесноту зависимости характеристик снежного покрова с водностью рек в период половодья, была построена корреляционная матрица (таблицы 3.7 и 3.8).

Таблица 3.7. Коэффициенты корреляции стока рек Нарынского бассейна за период май-сентябрь с числом дней со снежным покровом за холодный период (сентябрь-апрель) по данным метеостанций за период с сентября по апрель.

| Название реки – гидропоста | Название метеостанции | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|-------|---------|------|----------|-----------|
| | Тянь-Шань | Нарын | Ит-Агар | Чаек | Тюя-Ашуу | Сууса-мыр |
| Приток воды в Токтогульское вдхр. | 0,82 | 0,34 | 0,11 | 0,35 | 0,28 | 0,11 |
| р.Нарын – с.Уч-Терек | 0,84 | 0,34 | 0,15 | 0,39 | 0,25 | 0,22 |
| р.Нарын – город Нарын | 0,81 | 0,31 | 0,00 | 0,37 | 0,21 | 0,34 |
| р.Узун-Акмат – устье р.Уста-Сай | 0,19 | 0,24 | 0,23 | 0,09 | 0,25 | -0,42 |
| р.Чычкан – устье р.Бала-Чычкан | 0,66 | 0,12 | 0,21 | 0,31 | 0,60 | 0,21 |

Таблица 3.8. Коэффициенты корреляции стока рек Нарынского бассейна за период май-сентябрь с максимальной высотой снежного покрова по данным метеостанций (за период с сентября по апрель).

| Название реки - гидропоста | Название метеостанции | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|-------|---------|-------|----------|----------|
| | Тянь-Шань | Нарын | Ит-Агар | Чаек | Тюя-Ашуу | Суусамыр |
| Приток воды в Токтогульское вдхр. | 0,70 | 0,67 | -0,11 | 0,59 | 0,33 | 0,18 |
| р.Нарын – с.Уч-Терек | 0,69 | 0,67 | -0,15 | 0,63 | 0,32 | 0,15 |
| р.Нарын – г.Нарын | 0,31 | 0,35 | -0,21 | 0,38 | 0,34 | 0,15 |
| р.Узун-Акмат | 0,46 | 0,45 | 0,01 | 0,00 | 0,46 | 0,07 |
| р.Чычкан | 0,11 | 0,13 | -0,28 | 0,013 | 0,51 | 0,04 |

Полученные нами результаты показывают, что статистически значимыми для прогноза стока рек (гидропостов Уч-Терек, г.Нарын и Чычкан и притока воды в Токтогульское водохранилище) являются данные о числе дней со снежным покровом за холодный период (сентябрь-апрель) на высокогорной метеостанции Тянь-Шань, имеющие наибольшую тесноту зависимости (R) – 0,66-0,84. Данные о максимальной высоте снежного покрова по метеостанциям Тянь-Шань, Нарын, Чаек и Тюя-Ашуу имеют меньшую тесноту зависимости со стоком рек на период половодья. Для величины стока реки Узун-Акмат коэффициенты корреляции с данными о максимальной высоте снежного покрова со станциями Тянь-Шань, Нарын и Тюя-Ашуу составили 0,45-0,46, а с продолжительностью залегания снежного покрова еще меньше, т.е. эти данные не являются для нее статистически значимыми.

Краткие выводы к главе 3.

Результаты исследований показали, что на реке Нарын с 1993 года по настоящее время наблюдается стабильное повышение водности. Водность за период 1993-2015 г.г. в сравнении с периодом за 1945-1992 г.г. на реке составляет 121 % в верхнем и 113 % в нижнем течении.

Составленная матрица корреляции среднегодовых и средних за вегетационный период расходов воды с метеопараметрами показала, что наибольшее влияние на сток оказывают атмосферные осадки за холодный период времени, температура воздуха за весенний и осенний периоды, даты перехода температур воздуха через 0 °С в сторону положительных значений, число дней со снежным покровом за холодный период (сентябрь-апрель) и его максимальная высота на высокогорной метеостанции Тянь-Шань.

Наблюдается тенденция к повышению температуры воздуха и количества осадков за период наблюдений. Анализ суммарного количества осадков за холодный период времени показывает их увеличение на 5-12%. Температура воздуха за весенний и осенний период повысилась на 0,8-1,5°С, даты перехода

температуры воздуха через 0 °С в сторону положительных температур отмечаются на 10 дней раньше, а в сторону отрицательных – на 15 дней позже. Соответственно, повысилась сумма положительных температур воздуха с 2500 до 3000 °С (по данным метеостанции Нарын).

Все это приводит к повышению водности реки и изменению водного режима реки внутри года. При сложившейся тенденции паводки на реке Нарын будут проходить на 10-15 дней раньше, и более значительную роль в питании реки будут иметь сезонные запасы снега. Этот факт подтверждает также исследование компонентов стока по методу расчленения гидрографа. Так за период 1992 по 2016 годы доля талого ледникового стока понизилась на 7-8 %, а талого снегового стока увеличилась на 5-12 % в годовом стоке.

Исследование компонентов стока также показало, что за период с 1992 по 2016 г.г. объем талого ледникового стока увеличился на 20 % в верховье реки Нарын, но понизился на 8 % в нижнем течении реки Нарын, что связано с глобальным потеплением и сокращением площади оледенения в бассейне реки Нарын (на 20%) за последние 70 лет.

Также за период с 1992 по 2016 годы увеличился объем талого снегового стока в 1,6-2,3 раза, что связано как с общей тенденцией увеличения осадков за холодный период, так и с условиями накопления снеготалых вод за холодный период, в частности в 2016 году по сравнению с 1992 годом.

Увеличение меженного стока реки на 30-40 % связано также с увеличением объема грунтового стока как за счет поступления талых вод сезонного снега и ледников, так и за счет дождевых вод, а также увеличением продолжительности теплого периода.

ГЛАВА 4. ИННОВАЦИОННАЯ МЕТОДИКА ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА СТОКА РЕК НАРЫНСКОГО БАССЕЙНА И ПРИТОКА ВОДЫ В ТОКТОГУЛЬСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ.

4.1. Прогноз стока на основе данных о продолжительности и максимальной высоте снежного покрова по данным постоянных реек наземной сети наблюдений.

Для получения надежного и достоверного прогноза стока на период половодья в качестве аргументов для уравнений соискателем были использованы данные о числе дней со снежным покровом за холодный период (сентябрь-апрель) на метеостанции Тянь-Шань, имеющие наиболее тесные зависимости со стоком, чем данные о максимальной высоте снежного покрова [122]. Коэффициент корреляции (R) рассчитанных уравнений линейных зависимостей изменяются в пределах 0,66-0,84, критерий применимости качества прогнозов (S/σ) составляет - 0,54-0,78 (Таблица 4.1).

Таблица 4.1. Уравнения для прогнозов расходов воды рек Нарынского бассейна на период май-сентябрь в зависимости от количества дней со снежным покровом за холодный период по данным метеостанции Тянь-Шань.

| № | Название объекта | Расчетное уравнение | R | S/σ |
|---|--------------------------------|------------------------|------|------------|
| 1 | Приток в Токтогульскоевдхр. | $6,02 * N_{sn} - 417$ | 0,82 | 0,58 |
| 3 | р.Нарын – с.Уч-Терек | $4,94 * N_{sn} - 329$ | 0,84 | 0,54 |
| 5 | р.Нарын – г. Нарын | $1,6 * N_{sn} - 101$ | 0,81 | 0,59 |
| 6 | р.Чычкан – устье р.Бала-Чычкан | $0,25 * N_{sn} - 14,3$ | 0,66 | 0,75 |

Примечание: N_{sn} – количество дней со снежным покровом за холодный период (сентябрь-апрель) по данным метеостанции Тянь-Шань, R– коэффициент корреляции, S/σ –критерий применимости качества прогнозов.

Оправдываемость прогнозов стока за период с 2000 по 2015 гг. по реке Нарын составила 67-81 %, по реке Чычкан – лишь 50 %. Проверка предлагаемых уравнений была выполнена следующим путем:

1) Были выделены для расчета проверочных прогнозов 2 года с аномальной водностью (многоводный, маловодный) и один год средний по водности.

2) Исключив из анализа эти три года, определены коэффициенты для уравнений.

3) Используя новые формулы, были рассчитаны "прогнозы" на период половодья для проверочных лет как было описано в методике.

4) Была рассчитана оправдываемость методики для этих проверочных лет, с использованием для этого фактических данных, которые не вошли в определение коэффициентов регрессии уравнений.

Расчеты стока по предложенным уравнениям, где в качестве предиктора использовались данные о количестве дней со снежным покровом по трем проверочным годам: многоводному 2002 г., маловодному 2008 г. и среднему по водности 2009 г. на период май-сентябрь по предложенным уравнениям показали высокую – 100 %-ную оправдываемость прогнозов по притоку воды в Токтогульское водохранилище и нижнему течению реки Нарын в створе с.Уч-Терек. При этом, в створе г.Нарын прогноз в 2002 г. не оправдался. Результаты оправдываемости прогнозов по проверочным годам даны в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Результаты расчета стока рек на период май-сентябрь с данными о количестве дней со снежным покровом по МС Тянь-Шань.

| № | Название объекта | δ , м ³ /с | Рассчитанный сток, м ³ /с | | | Фактический сток, м ³ /с | | |
|---|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|------|------|----------------------------------------|------|------|
| | | | 2002 | 2008 | 2009 | 2002 | 2008 | 2009 |
| 1 | Приток в Токтогульское вдхр. | 100 | 961 | 595 | 748 | 937 | 520 | 770 |
| 2 | р.Нарын – с.Уч Терек | 92,6 | 798 | 502 | 626 | 797 | 450 | 652 |
| 3 | р.Нарын – г.Нарын | 24,8 | 248 | 171 | 203 | 303 | 162 | 181 |

Примечание: δ - Допустимая погрешность прогноза

Проверочные прогнозы для реки Чычкан не производились, т.к. ряд наблюдений недостаточен для их расчетов, кроме того отсутствовали наблюдения в экстремальные по водности годы (2002, 2008, 2010). Для прогноза водности реки Узун-Акмат на вегетационный период зависимости с данным о снежном покрове по наземным наблюдениям не были установлены.

Недостатком предложенных уравнений при использовании в оперативном гидрологическом прогнозировании является применение в качестве аргумента данных о снежном покрове лишь одной, оказавшейся наиболее репрезентативной, высокогорной метеостанции Тянь-Шань. Таким образом, достоверность составленного прогноза зависит от качества данных, регулярности наблюдений и технической исправности этой метеостанции. Данные о снежном покрове других метеостанций не могут использоваться для получения достоверного прогноза.

4.2. Прогноз стока на основе данных о площади снежного покрова по данным спутниковых снимков MODIS, в том числе для рек с отсутствием наблюдений.

Расчеты стока на период вегетации и его месяцы с использованием спутниковых снимков MODIS нами были произведены по формулам 2.11 и 2.2, предложенными нами в главе 2, подразделе 2.3.4 [122, 123].

Для прогноза притока воды в Токтогульское водохранилище использовалась информация о площади снежного покрова, рассчитанная в программе MODSNOW-Tool (Рис. 4.1), получаемая ежедневно. Для прогноза водности рек остальных водосборов использовалась программа ArcMap 10.1 и пакет программ Spatial Analyzed Tool.

Уравнения и качество предложенной методике для прогноза стока реки Нарын и притока воды в Токтогульское вдхр. представлены в таблице 4.3.

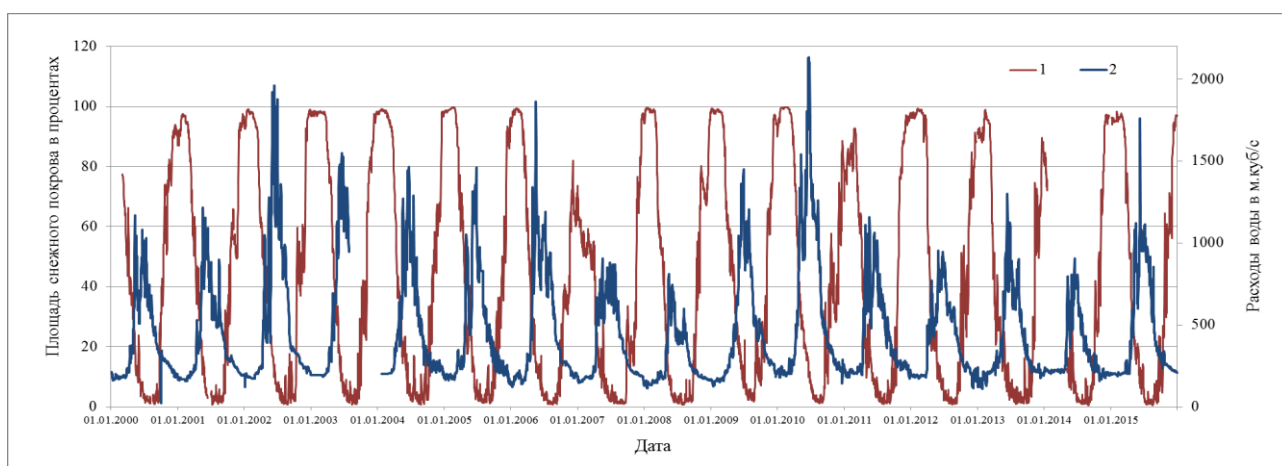


Рис. 4.1. Суточный ход изменения снежного покрова (1) по данным MODSNOW-Tool и совмещенный с ним гидрограф притока воды в Токтогульское водохранилище (2) с 2000 по 2015 гг.

Таблица 4.3. Уравнения для долгосрочного прогноза расхода воды реки Нарын и притока воды в Токтогульское водохранилище на вегетационный период. Основные характеристики уравнений R^2 , S/σ и обеспеченность допустимой погрешности за период с 2000 по 2015 гг.

| № | Название объекта | Расчетное уравнение | R^2 | S/σ | Обеспеченность допустимой погрешности в % |
|------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------|-------|------------|-------------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Прогноз на вегетационный период (апрель-сентябрь) | | | | | |
| 1 | Приток в Токтогульское вдхр. | $1,82*Q_3+6,62*S_{sn90}-155$ | 0,56 | 0,66 | 81 |
| 2 | р.Нарын – с.Уч Терек | $1,63*Q_3+5,39*S_{sn90}-103$ | 0,55 | 0,64 | 75 |
| 3.1 | р.Нарын – г. Нарын | $2,0*Q_3+1,55*S_{sn90}-8,4$ | 0,43 | 0,80 | 69 |
| 3.2 | р.Нарын – г. Нарын | $29,0*T_{6-8} + 2,55Q_3 + 1,48*S_{sn90} - 152$ | 0,57 | 0,65 | 75 |
| 4 | р.Узун-Акмат – устье р.Уста-Сай | $2,94*Q_3+0,35*S_{sn90}-12,9$ | 0,57 | 0,65 | 80 |
| 5 | р.Чычкан – устье р.Бала-Чычкан | нет надежных зависимостей | | | |
| Уточнение прогноза на вегетационный период (май-сентябрь) | | | | | |
| 6 | Приток в Токтогульское вдхр. | $1,08*Q_4+9,31*S_{sn120}+13$ | 0,74 | 0,68 | 88 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|------------------------------------|--------------------------------------------------|------|------|----|
| 7 | р.Нарын – с.Уч Терек | $1,16*Q_4+7,6*S_{sn120}+2,44$ | 0,74 | 0,68 | 75 |
| 8.1 | р.Нарын – г. Нарын | $1,58*Q_4+2*S_{sn120}-5,86$ | 0,65 | 0,59 | 63 |
| 8.2 | р.Нарын – г. Нарын | $30,3*T_{6-8} + 1,39*Q_4 + 2,08*S_{sn120} - 137$ | 0,76 | 0,49 | 81 |
| 9 | р.Узун-Акмат – устье р.Уста-Сай | $0,69*Q_4+0,78*S_{sn120}+1$ | 0,78 | 0,47 | 91 |
| 10 | р.Чычкан – устье р.Бала-Чычкан | $0,76*S_{sn120}-12,9$ | 0,54 | 0,63 | 64 |

Примечание: Q_3 , Q_4 - расход воды за март / апрель, S_{sn90} , S_{sn120} - площадь снежного покрова в процентах от общей площади бассейна рек Нарынского бассейна на 30 марта / апреля (90-й / 120-й день по Юлианскому календарю), R - коэффициент корреляции, S/σ -критерий применимости методики.

Преимущество использования спутниковой информации заключается в получении пространственной характеристики снежного покрова всего речного бассейна, тогда как информация по данным метеостанции характеризует условия снегонакопления лишь в одной точке. В условиях, когда в бассейнах отсутствует репрезентативная метеостанция, составление методики прогноза стока рек возможно будет только на основе данных о снежном покрове со спутниковых снимков.

Результаты расчетов стока рек Нарынского бассейна и притока воды в Токтогульское водохранилище на вегетационный период и на период май-сентябрь с использованием уравнений множественной линейной регрессии показали тесную корреляционную связь с площадью снежного покрова по данным снимков MODIS и предшествующим стоком. Коэффициент корреляции R составил 0,73-0,92 (для периода май-сентябрь) и 0,60-0,76 (для периода апрель-сентябрь), критерий применимости и качества прогнозов S/σ - 0,39-0,68 (для периода май-сентябрь) и 0,65 - 0,80 (для периода апрель-сентябрь). Разработанные уравнения соответствуют критериям качества методики хорошая и удовлетворительная (см. главу 2, подраздел 2.3.5 таб. 2.3). Надежность прогноза стока

на период май-сентябрь больше, чем на период апрель-сентябрь, что связано с большей площадью таяния сезонного снежного покрова начиная с мая, тогда как в апреле в горах республики часто еще происходит процесс накопления снежного покрова. Обеспеченность допустимой погрешности за 2000 – 2015 гг. составила для периода май-сентябрь 75-88 %, за исключением реки Чычкан, где оправдываемость прогнозов составила 64 % и для периода апрель-сентябрь 75-81 %.

Преимущество использования спутниковой информации заключается в получении пространственной характеристики снежного покрова всего речного бассейна, тогда как информация по данным метеостанции характеризует условия снегонакопления лишь в одной точке. В условиях, когда в бассейнах отсутствует репрезентативная метеостанция, составление методики прогноза стока рек возможно будет только на основе данных о снежном покрове со спутниковых снимков.

На рисунках 4.2 и 4.3 показаны графики фактического (1) и спрогнозированного (2) расходов воды за период половодья для притока в Токтогульское водохранилище и для г.Нарын, прогноз по которому составлялся в двух вариантах (2) – по двум параметрам площади снежного покрова и предшествующему стоку, рассчитанного по уравнению 2.11 и (3) – по трем параметрам, где дополнительно учтена температура воздуха за летний период – по уравнению 2.12.

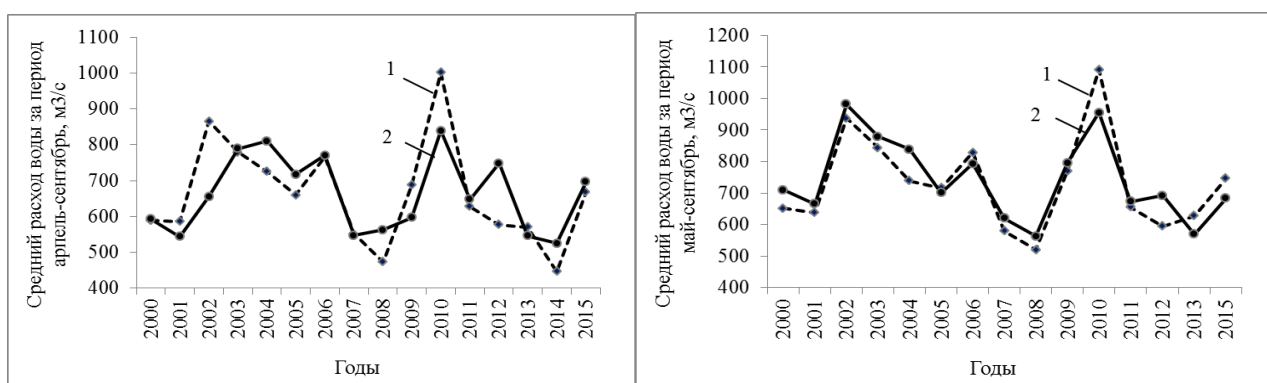


Рис. 4.2. График фактического (1) и спрогнозированного (2) по уравнению 2.11 расхода воды на период: апрель-сентябрь (слева) и май-сентябрь (справа) по притоку воды в Токтогульское вдхр.

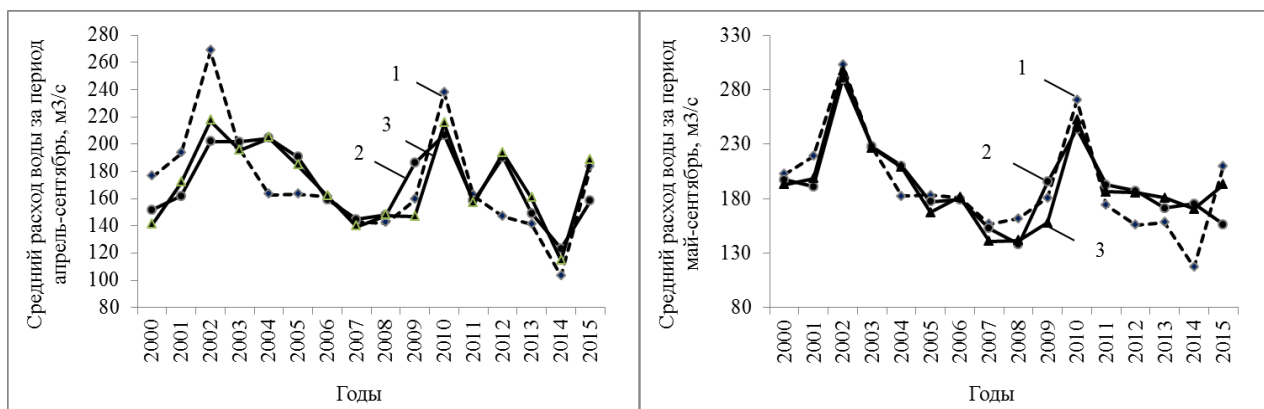


Рис. 4.3. График расхода воды фактического (1) и спрогнозированного (2), рассчитанным по уравнению 2.11 и (3) спрогнозированного по уравнению 2.12 на период: апрель-сентябрь (слева) и май-сентябрь (справа) в верховьях реки Нарын – г.Нарын.

Для проверки предлагаемой методики прогноза водности на период половодья мы применили тот же подход, что был использован выше для проверки уравнений. Оправдываемость прогнозов за период май-сентябрь по трем проверочным годам: многоводному (2002), маловодному (2008) и среднему по водности (2009) по предложенным уравнениям составила 100 % (табл. 4.4).

Таблица 4.4. Результаты расчета стока на 2002, 2008, 2009 г.г.

| № | Название объекта | δ , м ³ /с | Рассчитанный сток, м ³ /с | | | Фактический сток, м ³ /с | | |
|---|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|--------|--------|----------------------------------------|--------|--------|
| | | | 2002г. | 2008г. | 2009г. | 2002г. | 2008г. | 2009г. |
| 1 | Приток в Токтогульское вдхр. | 100 | 1010 | 529 | 783 | 937 | 520 | 770 |
| 2 | р.Нарын – с.Уч Терек | 92,6 | 786 | 487 | 682 | 797 | 450 | 652 |
| 3 | р.Нарын – г.Нарын | 24,8 | 281 | 151 | 161 | 303 | 162 | 181 |

Примечание: δ - допустимая погрешность прогноза.

Для проверки методики для последующих проверочных лет (2017, 2018 и 2019 гг.) в ГИС инструментах были проведены расчеты площади снежного снежного покрова на 30 марта по данным снимков MODIS, обработанных в программе MODSNOW-Tool (рис. 4.4). В таблице 4.5 расчеты, проведенные за последние эти проверочные годы с оправдываемостью прогнозов 100 %.

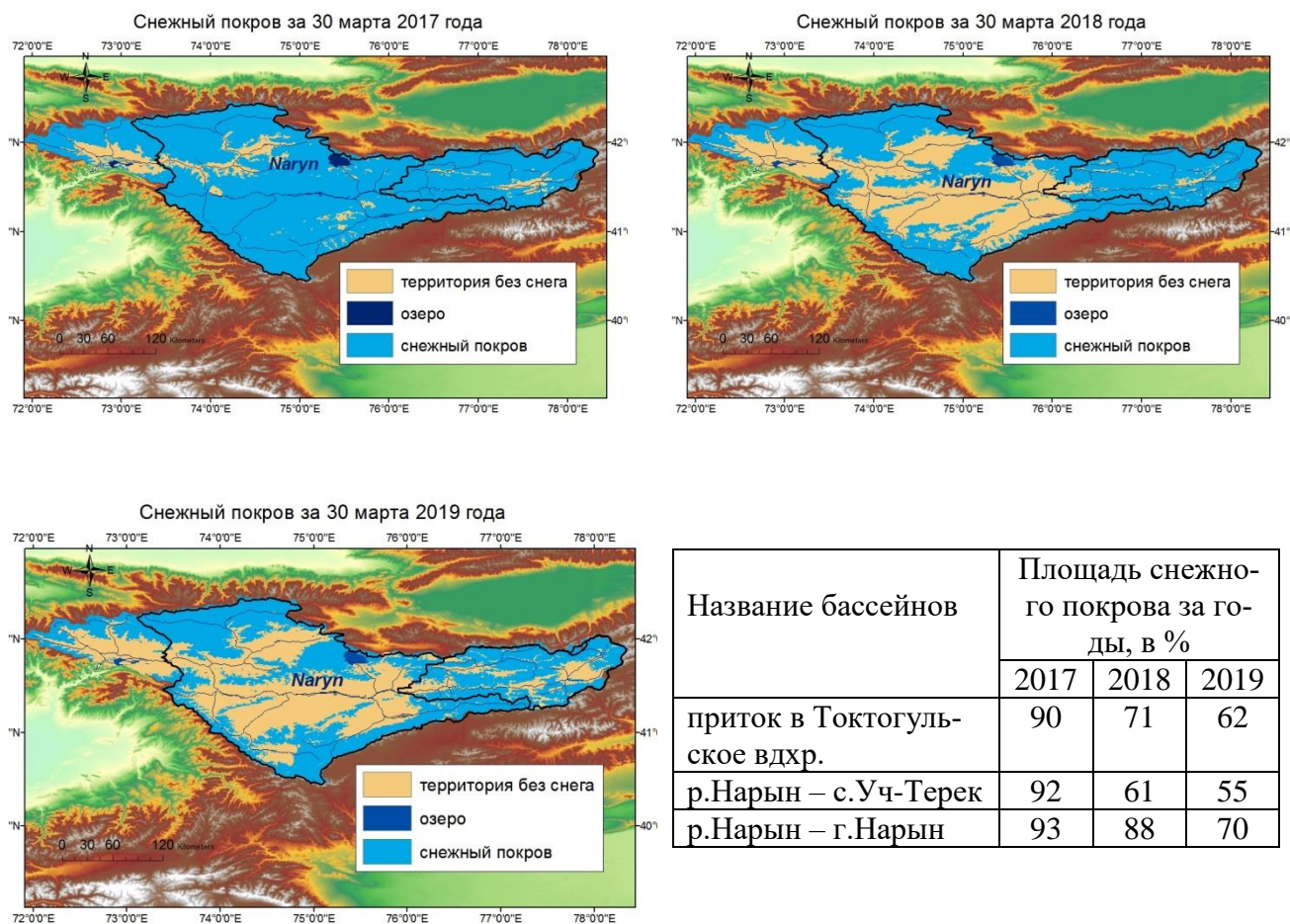


Рис. 4.4. Снежный покров за 30 марта 2017-2019 гг. по данным MODIS.

Таблица 4.5. Прогноз расхода воды на вегетационный период 2017 – 2019 проверочные годы, рассчитанный по уравнению 2.11.

| Название реки - гидропоста | Фактический расход воды, в м ³ /с | Спрогнозированный расход воды, в м ³ /с | Допустимая погрешность прогнозов | Оправдываемость |
|------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| За 2017 год | | | | |
| Приток в Токтогульское вдхр. | 831 | 817 | 100,0 | оправдался |
| р.Нарын – с.Уч Терек | 712 | 688 | 92,6 | оправдался |
| р.Нарын – г.Нарын | 190 | 208 | 26,0 | оправдался |
| За 2018 год | | | | |
| Приток в Токтогульское вдхр. | 642 | 724 | 100,0 | оправдался |
| р.Нарын – с.Уч Терек | 581 | 562 | 92,6 | оправдался |
| р.Нарын – г.Нарын | 161 | 186 | 26,0 | оправдался |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------------|-----|-----|-------|------------|
| За 2019 год | | | | |
| Приток в Токтогульское вдхр. | 590 | 663 | 100,0 | оправдался |
| р.Нарын – с.Уч Терек | 485 | 533 | 92,6 | оправдался |
| р.Нарын – г.Нарын | 175 | 166 | 26,0 | оправдался |

Расчеты поверочных прогнозов стока боковых притоков Токтогульского водохранилища, рек Узун-Амат и Чычкан, не производились, т.к. они не имеют достаточного объема наблюдений, кроме того отсутствуют наблюдения в экстремальные по водности годы.

Полученные тесные зависимости стока реки Нарын с данными спутниковых снимков MODIS позволяют также использовать их для моделирования и прогноза стока рек снегово-ледникового типа питания в современных условиях [124].

Перерасчет коэффициентов дополняется более свежими данными за последний период, взаимозависимости между данными о стоке за период половодья и площадью заснеженности со спутниковых снимков MODIS будут более стабильными и расчет проверочных прогнозов будет возможен для всех объектов. Одной из существующих проблем в определении стока рек высокогорных районов (со средней высотой выше 3500 м.) на период половодья предложенными методами является сложность получения надежного метеопрогноза средней температуры воздуха или ее аномалий на текущий летний период к моменту составления прогноза, от которых зависит интенсивность таяния ледников в высокогорной зоне. Однако в период с 2000 по 2019 годы наблюдалось лишь несколько лет с температурными аномалиями в летний период, преобладающее число лет было с температурами близкими к нормам. Таким образом, для составления прогноза водности реки Нарын, например, в створе г.Нарын достаточно использовать уравнение, учитывающее два параметра – площадь снежного покрова и предшествующий меженный сток.

Используя предложенные автором диссертации уравнения 2.11 и 2.12, возможна оценка стока и составление долгосрочного прогноза для рек, на кото-

рых не имеется наблюдений за стоком, но в образовании их стока основной вклад вносит сезонный снежный покров. Мы применили нашу методику оценки стока на основе данных о снежном покрове спутниковых снимков MODIS для основных притоков реки Нарын [125, 126].

Так, одними из важных объектов в исследуемом бассейне являются основные притоки реки Нарын – Ат-Башы, Алабуга и Торкент, на которых наблюдения были прекращены в 1995-1997 годах. Однако, информация об ожидаемом стоке на период половодья, является крайне важной, т.к. потопления и наводнения в экстремальные по водности годы приносят ущерб сельскому хозяйству, населенным пунктам, мостам, автодорогам и т.д. [127].

Для реконструкции стока за период половодья и за апрель, необходимый в качестве предиктора для прогноза стока, была построена корреляционная матрица зависимости стока рек Ат-Башы, Алабуга и Торкент со стоком рек, на которых в настоящее время проводятся наблюдения. (Таблица 4.6) [125, 126].

Таблица 4.6. Корреляционная матрица связей средних расходов воды за период май-сентябрь на реках Нарынского бассейна.

| № п/п | Название реки - гидропоста | R с соответствующими гидропостами | | | | | | | |
|----------|---------------------------------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | р.Нарын – г.Нарын | 1.00 | 0.76 | 0.81 | 0.61 | 0.49 | 0.41 | 0.44 | 0.44 |
| 2 | р.Нарын – с.Уч-Терек | | 1.00 | 0.75 | 0.83 | 0.69 | 0.83 | 0.65 | 0.69 |
| 3 | р.Чон-Нарын – устье | | | 1.00 | 0.63 | 0.56 | 0.41 | 0.51 | 0.46 |
| 4 | р.Ат-Башы – устье р.Ача-Команды | | | | 1.00 | 0.33 | 0.76 | 0.60 | 0.53 |
| 5 | р.Алабуга – с.Кош-Дебео | | | | | 1.00 | 0.57 | 0.16 | 0.46 |
| 6 | р.Торкент – с.Торкент | | | | | | 1.00 | 0.61 | 0.48 |
| 7 | р.Чычкан – устье р.Бала-Чычкан | | | | | | | 1.00 | 0.75 |
| 8 | р.Узун-Акмат – устье р.Уста Сай | | | | | | | | 1.00 |

Наибольший коэффициент корреляции (R) стока рек Ат-Баши, Алабуга и Торкент за период половодья был выявлен со стоком реки Нарын в створе Уч-Терек – 0,69-0,83

Соответственно, были предложены уравнения реконструкции данных трех рек по данным р.Нарын – с.Уч-Терек, рассчитанными за имеющиеся периоды наблюдений до 1995-1997 гг.:

$$Q_{5-9} \text{ Ат-Баши} = 0,71 * Q_4 \text{ Ат-Баши} + 0,23 * S_{n120} + 8,53 \quad (4.1)$$

$$Q_{5-9} \text{ Алабуга} = 0,816 * Q_4 \text{ Алабуга} + 0,32 * S_{n120} + 21,5 \quad (4.2)$$

$$Q_{5-9} \text{ Торкент} = 0,036 * Q_{5-9} \text{ р.Нарын – с.Уч-Терек} + 0,06 \quad (4.3)$$

Согласно предложенному соискателем уравнению (2.11) необходимо также восстановить данные о стоке за апрель, так как этот месяц является одним из предикторов в расчетном уравнении (таблица 4.7).

Таблица 4.7. Корреляционная матрица расходов воды за апрель на реках Нарынского бассейна.

| № п/п | Название реки - гидропоста | R с соответствующими гидропостами | | | | | | | |
|-------|------------------------------------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | р.Нарын – г.Нарын | 1.00 | 0.77 | 0.81 | 0.62 | 0.69 | 0.55 | 0.25 | 0.35 |
| 2 | р.Нарын – с.Уч-Терек | | 1.00 | 0.78 | 0.69 | 0.68 | 0.34 | 0.42 | 0.53 |
| 3 | р.Чон-Нарын – устье | | | 1.00 | 0.60 | 0.52 | 0.36 | 0.16 | 0.37 |
| 4 | р.Узун-Акмат – устье р.Уста Сай | | | | 1.00 | 0.73 | 0.34 | 0.34 | 0.53 |
| 5 | р.Чычкан – устье р.Бала-Чычкан | | | | | 1.00 | 0.28 | -0.10 | 0.52 |
| 6 | р.Ат-Баши – устье р.Ача-Команды | | | | | | 1.00 | 0.41 | 0.07 |
| 7 | р.Алабуга – с.Кош-Дебео | | | | | | | 1.00 | -0.10 |
| 8 | р.Торкент – с.Торкент | | | | | | | | 1.00 |

Наибольший коэффициент корреляции расходов воды на реке Ат-Баши оказался с расходами воды на р.Нарын в створе г.Нарын – 0,55, а на реках Ала-

буга и Торкент – с расходами воды на реке Нарын в створе с.Уч-Терек – 0,42-0,53. Для реки Торкент выявлена также тесная зависимость с расходами воды на реках Чычкан и Узун-Акмат – 0,52-0,53, но так как с 2005 года на них не было наблюдений в течение нескольких лет, для реконструкции стока были выбраны данные по гидропосту Уч-Терек.

Соответственно, уравнения для восстановления расходов воды за отсутствующие периоды наблюдений выбраны следующие:

$$Q_4 \text{ Ат-Башы} = 0,19 * Q_4 \text{ р.Нарын} - \text{г.Нарын} + 3,1 \quad (4.4)$$

$$Q_4 \text{ Алабуга} = 0,06 * Q_4 \text{ р.Нарын} - \text{с.Уч-Терек} + 11,3 \quad (4.5)$$

$$Q_4 \text{ Торкент} = 0,03 * Q_4 \text{ р.Нарын} - \text{с.Уч-Терек} + 2,4 \quad (4.6)$$

Получив восстановленные расходы воды по трем водотокам за период 2000-2016 гг. и, производя расчеты площади снежного покрова за тот же период по данным спутниковых снимков MODIS с помощью инструментов ArcGIS по описанной нами методике, можно рассчитать уравнения для прогноза стока по рекам Ат-Башы, Торкент и Алабуга на период май-сентябрь [125, 126]:

$$1. Q_{5-9} \text{ Ат-Башы} = 0,826 * Q_4 \text{ Ат-Башы} + 0,23 * S_{n120} + 6,2, \quad R^2=0,62 \quad (4.7)$$

$$2. Q_{5-9} \text{ Алабуга} = 1,048 * Q_4 \text{ Алабуга} + 0,465 * S_{n120} + 8,6, \quad R^2=0,55 \quad (4.8)$$

$$3. Q_{5-9} \text{ Торкент} = 1,11 * Q_4 \text{ Торкент} - 0,21 * S_{n120} + 19,1, \quad R^2=0,29 \quad (4.9)$$

Рассчитаем прогноз водности рек на период половодья на независимые (проверочные) 2017 и 2018 годы [126]. Один из предикторов – площадь снежного покрова на 30 апреля (120-й день по Юлианскому календарю) 2017 и 2018 гг. (Рис. 4.5), мы рассчитываем по имеющейся карте снежного покрова, полученной после дешифрирования в программе MODSNOW-Tool спутникового снимка MODIS. Результаты расчетов представлены в таблице 4.8 и на рис. 4.6.

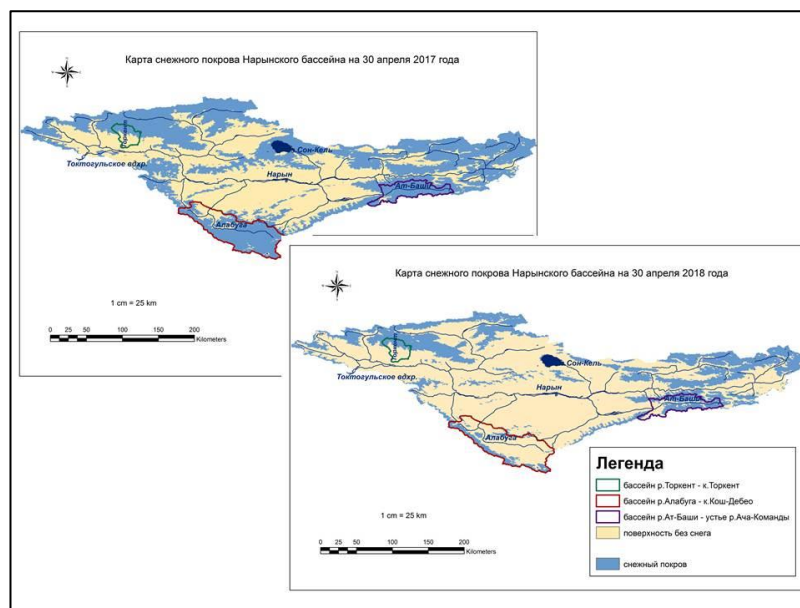


Рис. 4.5. Карта-схема снежного покрова Нарынского бассейна на 30 апреля 2017 и 2018 г.г.

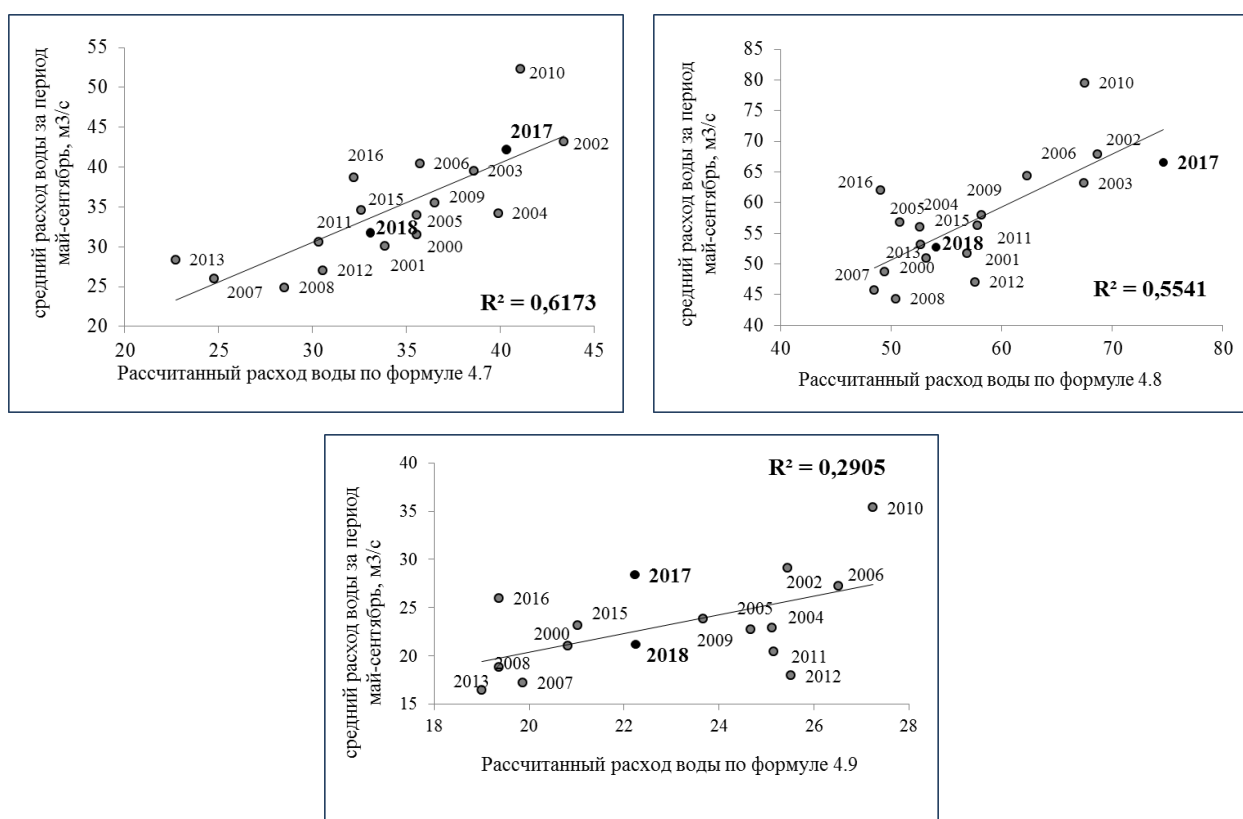


Рис. 4.6. Графики зависимостей фактических и рассчитанных расходов воды и спрогнозированные за 2017 и 2018 г.г., по уравнениям 4.7 - 4.9 по рекам Ат-Баши (сверху слева), Алабуга (сверху справа) и Торкент (снизу).

Прогноз водности на 2017 и 2018 годы, норма (средний расход воды за период май-сентябрь) и максимальный расход воды (май-сентябрь) за многолет-

ний ряд наблюдений 1941-1994 (Ат-Баши), 1960-1992 (Алабуга), 1966-1993 (Торкент) и отношение спрогнозированного расхода воды к норме представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8. Прогноз и его отношение к норме на 2017 и 2018 годы.

| Годы | Площадь снежного покрова в % | Расход воды за апрель, м ³ /с | Рассчитанный расход воды за май-сентябрь, м ³ /с | Норма, м ³ /с | Максимальный расход воды за май-сентябрь, м ³ /с | Отношение к норме в % |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------|
| р.Ат-Баши – устье р.Ача-Команды | | | | | | |
| 2017 | 96 | 14,6 | 41,0 | 27,9 | 45,2 | 147% |
| 2018 | 68 | 13,6 | 33,8 | 27,9 | 45,2 | 121% |
| р.Алабуга – к.Кош-Дебео | | | | | | |
| 2017 | 83 | 32,6 | 74,6 | 44,8 | 71,6 | 167 % |
| 2018 | 25 | 28,5 | 52,7 | 44,8 | 71,6 | 117 % |
| р.Торкент – к.Торкент | | | | | | |
| 2017 | 49 | 12,1 | 28,4 | 19,5 | 34,3 | 146 % |
| 2018 | 39 | 10,2 | 21,2 | 19,5 | 34,3 | 109 % |

В результате прогноз средних расходов воды за период на май-сентябрь по рекам на 2018 год был в пределах нормы, а на 2017 год ожидался значительно выше – 146-167 % нормы, приближаясь к максимальным расходам воды за весь период наблюдений, чему способствовало значительное накопление снега в бассейнах этих рек [125, 126].

Таким образом, водохозяйственные организации, силы по чрезвычайным ситуациям и айилакмоту могут использовать этот прогноз водности рек Ат-Баши и Алабуга для решения по принятию соответствующих превентивных мер по предупреждению наводнений и сокращению степени их последствий.

Одним из основных преимуществ метода является возможность прогнозирования стока рек, расположенных в высокогорных бассейнах (на высоте 2,4-3,7 км в данном исследовании), где получение информации о снегонакоплении или осадках в зимний период проблематично без использования спутниковых данных. ГИС позволяет интерпретировать информацию, полученную с помощью дистанционного зондирования, для дальнейшего применения в различных подбассейнах.

4.3. Прогноз стока с использованием статистических моделей в R-program.

Программное обеспечение по прогнозу стока рек Средней Азии с использованием статистического моделирования в R-program было подготовлено в 2016 г. Для применения в практике оперативного гидрологического прогнозирования нами были разработаны модели для бассейна реки Нарын по створам г.Нарын, с.Уч-Терек и притока в Токтогульское водохранилище [128, 129]. Программное обеспечение R-program было внедрено в систему Кыргызгидромета в марте 2017 г. и прошло апробацию в течение 2017-2019 годов, но работы по усовершенствованию R-программы продолжаются и в настоящее время [130].

Входящими данными для расчета прогнозов являются переменные: среднемесячная температура воздуха и месячная сумма осадков по опорным (репрезентативным) метеостанциям, средние месячные расходы воды по притоку в Токтогульское водохранилище, створам Уч-Терек и г.Нарын, суточные данные площади снежного покрова для Нарынского бассейна, взятые из программы MODSNOW-Tool.

Для рек Нарынского бассейна были подготовлены модели прогноза стока на р.Нарын в створе г.Нарын, и в створе Уч-Терек, а также для притока воды в Токтогульское водохранилище. В качестве предикторов использованы данные о площади снежного покрова с суточным шагом, обработанные в программе MODSNOW-Tool, средняя месячная температура воздуха и месячная сумма осадков на метеостанции Тянь-Шань и средние месячные расходы воды по соответствующим створам. В программе были рассчитаны 20 наиболее эффективных моделей для прогноза стока рек (Рис. 4.7). Программа успешно прогнозирует сток на экстремальные по водности годы маловодные и многоводные, но в годы со средней водностью, 2004, 2012, 2013, результаты расчетов оказались хуже.

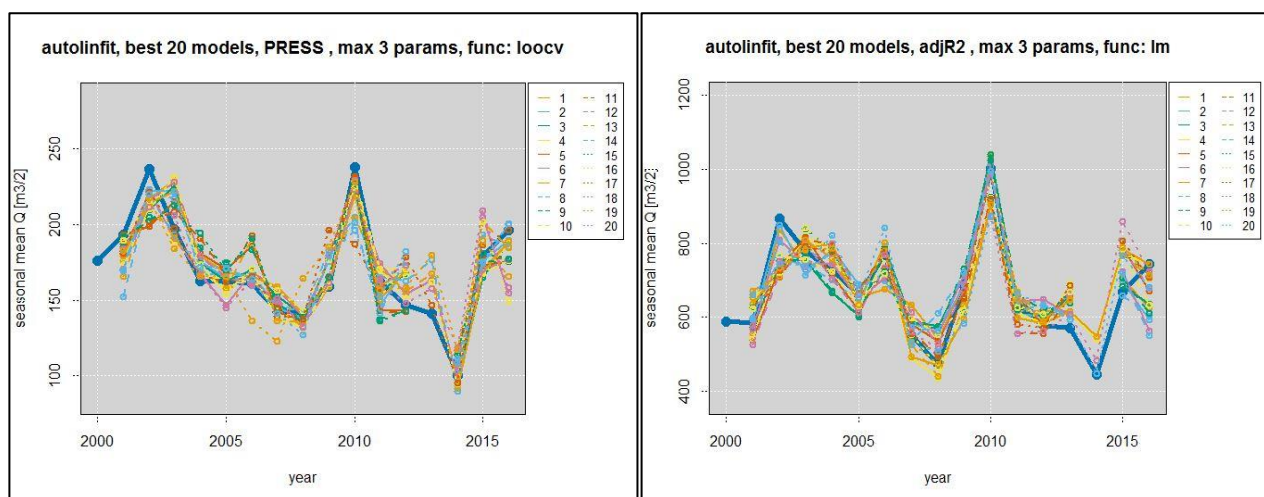


Рис. 4.7. Графики хода расходов воды за период апрель-сентябрь в верховьях реки Нарын – г.Нарын притока воды (слева) в Токтогульское водохранилище (справа) за 2000-2015 гг. фактического (синий цвета) и (2) спрогнозированного по трем параметрам по 20-и линейным уравнениям.

В 18-и из 20-и уравнений, составленных для прогноза стока на р.Нарын в створе г.Нарын, используются данные о предшествующих расходах воды за различные периоды с октября по март, данные о снежном покрове, в основном за период с января по февраль (март) и данные о температуре воздуха – за период с ноября по февраль (рис. 4.8)., что указывает на то что в формировании стока верхнего течения реки Нарын наибольшую роль играет площадь снежного покрова в январе (максимальная площадь за зимний период), температурные условия зимнего периода, а также базисный (меженный) сток.

```
[1] "snowcov_janfeb + temp_novfeb + Q_decmar"
[1] "snowcov_janfeb + temp_novfeb + Q_novmar"
[1] "snowcov_jan + temp_novfeb + Q_octmar"
[1] "snowcov_jan + temp_novfeb + Q_novmar"
[1] "snowcov_janfeb + temp_novfeb + Q_octmar"
[1] "snowcov_janmar + temp_novfeb + Q_decmar"
[1] "snowcov_feb + temp_novfeb + Q_decmar"
[1] "snowcov_jan + temp_novfeb + Q_decmar"
[1] "snowcov_janmar + temp_novfeb + Q_novmar"
[1] "snowcov_janfeb + temp_novfeb + Q_janmar"
[1] "snowcov_janmar + temp_novfeb + Q_octmar"
[1] "snowcov_janfeb + temp_novfeb + Q_jan"
[1] "snowcov_jan + temp_decfeb + Q_novmar"
[1] "snowcov_jan + temp_decfeb + Q_octmar"
[1] "temp_febmar + sc_precip_mar_novmar + temp_precip_novmar"
[1] "snowcov_febmar + temp_novfeb + Q_decmar"
[1] "snowcov_jan + temp_janfeb + Q_octmar"
[1] "snowcov_feb + temp_novfeb + Q_novmar"
[1] "snowcov_jan + temp_janfeb + Q_novmar"
[1] "temp_janmar + sc_precip_mar_decmar + temp_precip_decmar"
```

Рис. 4.8. Линейные уравнения для расчета среднего стока вегетационного периода (р.Нарын-г.Нарын).

Для прогноза притока воды в Токтогульское водохранилище наиболее значимыми оказались метеоусловия холодного периода года с ноября по март (Рис. 4.9). Большую роль играют такие факторы как снежный покров, атмосферные осадки и температура воздуха за этот период. Метеоусловия октября, как и в случае с г.Нарын, не значимы при формировании стока за вегетационный период. Предшествующий сток за период октябрь-март оказался значимым в 50 % случаев.

```
[1] "precip_feb + sc_precip_mar_decmar + temp_precip_novmar"
[1] "precip_novmar + sc_precip_mar_decmar + temp_precip_feb"
[1] "sc_precip_mar_decmar + temp_precip_novmar + sc_temp_precip_febmar"
[1] "snowcov_jan + temp_decfeb + Q_octmar"
[1] "precip_novmar + temp_jan + sc_precip_mar_decmar"
[1] "precip_janfeb + sc_precip_mar_decmar + temp_precip_novmar"
[1] "snowcov_jan + temp_janfeb + Q_octmar"
[1] "precip_novmar + sc_precip_mar_decmar + sc_temp_precip_febmar"
[1] "sc_precip_mar_decmar + temp_precip_novmar + sc_temp_precip_janmar"
[1] "precip_novmar + temp_janmar + sc_precip_mar_decmar"
[1] "precip_febmar + temp_janfeb + sc_temp_precip_janmar"
[1] "temp_jan + sc_precip_mar_decmar + temp_precip_novmar"
[1] "snowcov_janfeb + temp_decfeb + Q_octmar"
[1] "precip_novmar + sc_precip_mar_decmar + temp_precip_janfeb"
[1] "snowcov_janmar + temp_jan + Q_octmar"
[1] "snowcov_febmar + temp_jan + Q_octmar"
[1] "snowcov_febmar + precip_jan + temp_janfeb"
[1] "snowcov_jan + temp_janfeb + temp_precip_mar"
[1] "snowcov_janfeb + temp_janfeb + Q_octmar"
[1] "snowcov_jan + temp_feb + Q_octmar"
```

Рис. 4.9. Линейные уравнения для расчета среднего стока за вегетационный период, притекающего в Токтогульское водохранилище.

Результаты расчетов критериев надежности представленных линейных уравнений представлены в табличном виде (рис. 4.10), они автоматически составляются программой и выводятся в формате рисунка.

| | R2 | adjR2 | RMSE | MAE | SSQ | S_sig_mean | S_sig_crit | R2cv | adjR2cv | RMSEcv | MAEcv | PRESS | S_sig_meancv | S_sig_critcv |
|----|-----------|-----------|----------|----------|----------|------------|------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|--------------|--------------|
| 1 | 0.8277987 | 0.7808348 | 54.12013 | 43.78875 | 43934.82 | 0.3119798 | 0.8235294 | 0.7503596 | 0.6927503 | 72.42823 | 61.08548 | 78687.73 | 0.4352131 | 0.7647059 |
| 2 | 0.8079743 | 0.7556037 | 57.15053 | 43.14005 | 48992.75 | 0.3073580 | 0.8235294 | 0.7435100 | 0.6843200 | 73.41514 | 57.98158 | 80846.75 | 0.4130988 | 0.8823529 |
| 3 | 0.7385899 | 0.6672962 | 66.68096 | 52.44259 | 66695.26 | 0.3736354 | 0.7058824 | 0.6592867 | 0.5806605 | 84.61455 | 67.71874 | 107394.32 | 0.4824728 | 0.7058824 |
| 4 | 0.7596412 | 0.6940888 | 63.93971 | 48.46706 | 61324.30 | 0.3453112 | 0.8235294 | 0.6561476 | 0.5767971 | 85.00343 | 65.59999 | 108383.75 | 0.4673773 | 0.8235294 |
| 5 | 0.7359608 | 0.6639501 | 67.01544 | 53.00652 | 67366.03 | 0.3776532 | 0.7058824 | 0.6540850 | 0.5742585 | 85.25800 | 68.50545 | 109033.89 | 0.4880777 | 0.7058824 |
| 6 | 0.7235082 | 0.6481014 | 68.57752 | 47.23111 | 70543.15 | 0.3365054 | 0.7058824 | 0.6518706 | 0.5715330 | 85.53047 | 61.01189 | 109731.91 | 0.4346887 | 0.7647059 |
| 7 | 0.7317135 | 0.6585445 | 67.55228 | 49.43614 | 68449.67 | 0.3522155 | 0.7058824 | 0.6474011 | 0.5660321 | 86.07776 | 64.07106 | 111140.70 | 0.4564843 | 0.8235294 |
| 8 | 0.7835791 | 0.7245552 | 60.67227 | 49.56530 | 55216.87 | 0.3531357 | 0.7058824 | 0.6453591 | 0.5635189 | 86.32665 | 70.56327 | 111784.34 | 0.5027391 | 0.7058824 |
| 9 | 0.7357600 | 0.6636945 | 67.04092 | 47.50201 | 67417.28 | 0.3384355 | 0.7058824 | 0.6395772 | 0.5564027 | 87.02752 | 62.76098 | 113606.83 | 0.4471504 | 0.7647059 |
| 10 | 0.7445817 | 0.6749221 | 65.91233 | 51.77471 | 65166.54 | 0.3688770 | 0.7647059 | 0.6395172 | 0.5563288 | 87.03476 | 70.60913 | 113625.75 | 0.5030658 | 0.7647059 |
| 11 | 0.7512444 | 0.6834020 | 65.04697 | 46.20932 | 63466.63 | 0.3292255 | 0.7058824 | 0.6309297 | 0.5457596 | 88.06534 | 63.73303 | 116332.56 | 0.4540759 | 0.7647059 |
| 12 | 0.7502371 | 0.6821200 | 65.17854 | 53.27743 | 63723.62 | 0.3795833 | 0.7058824 | 0.6294068 | 0.5438853 | 88.24684 | 72.81909 | 116812.58 | 0.5188110 | 0.8235294 |
| 13 | 0.7158026 | 0.6382943 | 69.52655 | 54.82935 | 72509.12 | 0.3906402 | 0.7647059 | 0.6263564 | 0.5401309 | 88.60929 | 72.19683 | 117774.09 | 0.5143776 | 0.7058824 |
| 14 | 0.6931729 | 0.6164661 | 71.12378 | 58.14183 | 80937.47 | 0.4142405 | 0.7647059 | 0.6262339 | 0.5399802 | 88.62380 | 73.73416 | 117812.68 | 0.5253306 | 0.7647059 |
| 15 | 0.7690145 | 0.7060185 | 62.68058 | 49.50688 | 58932.83 | 0.3527195 | 0.7058824 | 0.6227755 | 0.5357237 | 89.03287 | 69.09466 | 118902.79 | 0.4922757 | 0.7647059 |
| 16 | 0.6980655 | 0.6157197 | 71.66334 | 50.82884 | 77034.50 | 0.3621380 | 0.8235294 | 0.6209654 | 0.5334958 | 89.24623 | 67.78628 | 119473.35 | 0.4829540 | 0.7647059 |
| 17 | 0.7075347 | 0.6277715 | 70.53064 | 50.50267 | 74618.56 | 0.3598142 | 0.7058824 | 0.6202803 | 0.5326527 | 89.32685 | 66.50355 | 119689.28 | 0.4738149 | 0.7058824 |
| 18 | 0.7229696 | 0.6474159 | 68.64428 | 50.63986 | 70680.55 | 0.3607916 | 0.7058824 | 0.6151844 | 0.5263808 | 89.92425 | 67.73525 | 121295.55 | 0.4825904 | 0.7647059 |
| 19 | 0.6972740 | 0.6147123 | 71.75721 | 51.65260 | 77236.46 | 0.3680070 | 0.7058824 | 0.6137475 | 0.5246123 | 90.09197 | 68.06263 | 121748.45 | 0.4849228 | 0.7647059 |
| 20 | 0.7304745 | 0.6569675 | 67.70810 | 51.67638 | 68765.80 | 0.3681764 | 0.7647059 | 0.6127495 | 0.5233840 | 90.20829 | 71.35854 | 122063.04 | 0.5084051 | 0.8235294 |

Рис. 4.10. Результаты критериев надежности линейных уравнений для прогноза притока в Токтогульское водохранилище.

Как видно из таблиц, коэффициент корреляции R^2 составил 0,70-0,84, критерий применимости и качества прогнозов S/σ - 0,30-0,47. Оправдываемость прогнозов за 2000 – 2015 гг. составила для периода май-сентябрь 65-88 %.

Результаты расчетов проверочных лет (2017-2019 гг.) показали 100 %-ную оправдываемость прогнозов притока воды в Токтогульское вдхр. (рис. 4.11, таб. 4.9) [129].

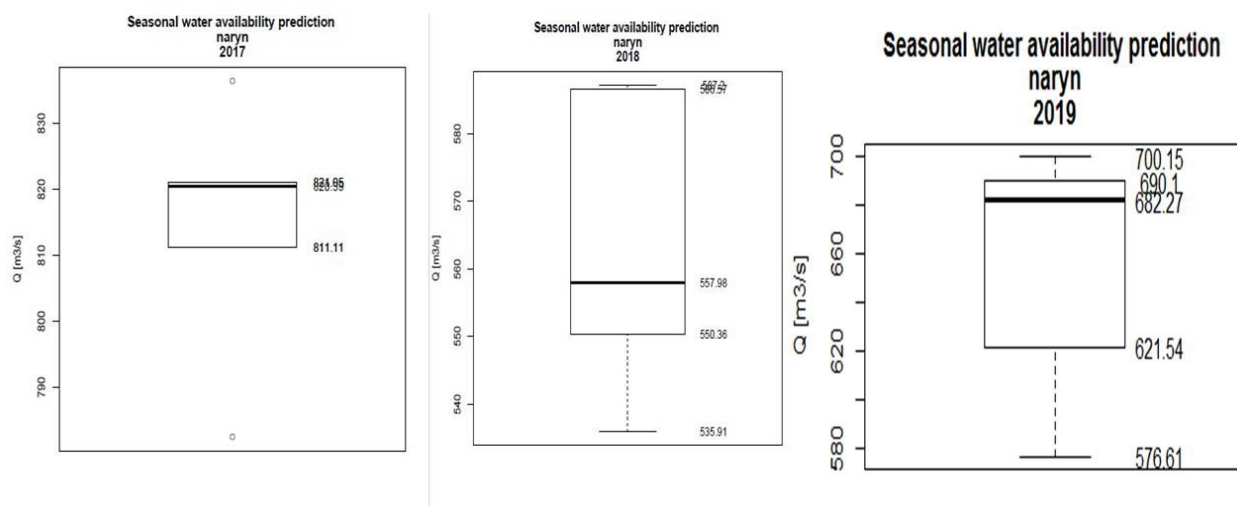


Рис. 4.11. Прогнозы притока воды в Токтогульское водохранилище в R-program на 2017-2019 годы.

Таблица 4.9. Прогноз притока воды в Токтогульское вдхр. на вегетационный период за 2017 – 2019 проверочные годы.

| Годы | Фактический расход воды, в м ³ /с | Спрогнозированный расход воды, в м ³ /с | Допустимая погрешность прогнозов | Оправдываемость в % |
|------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| 2017 | 831 | 820 | 100 | оправдался |
| 2018 | 642 | 557 | 100 | оправдался |
| 2019 | 590 | 682 | 100 | оправдался |

Программа составляет прогноз среднего вегетационного стока реки Нарын на вегетационный период, но имеет лишь один недостаток – для реализации расчетов в программе требуется суточная информация о площади снежного покрова, рассчитанная с 2000 г. по текущую дату и, далее при составлении прогноза, за гидрологический год (с 1 сентября по 31 марта).

4.4. Прогноз гидрологической засухи на зимне-весенний период.

Прогноз гидрологической засухи, составленный в ноябре, дает предпосылки для оценки возможной экстремальной водности в ранние сроки. Тогда как сам прогноз на вегетационный период составляется в первых числах февраля, марта и апреля, возможность учета сложившейся экстремальной ситуации в снегонакоплении, повышает эффективность прогнозов.

При разработке предлагаемой методики учитывалось влияние на гидрологическую ситуацию следующих региональных климатических факторов, характерных для Центральной Азии:

1. Вся территория Центральной Азии находится под влиянием как тропических, так и умеренных воздушных масс.
2. Климат резко континентальный из-за отдаленности территории от океанов.
3. Преобладает западный и северо-западный перенос воздушных масс в верхних слоях тропосферы.
4. Летом в районе Тибетского плато развиваются муссоны.

Существующие крупномасштабные атмосферные модели основаны на учете, как региональных климатических условий, так и на учете влияния таких условий, как температура поверхности моря, почвенно-растительный покров и влажность почвы. Тот факт, что эти условия часто характеризуется низкочастотной изменчивостью, приводит к определенной степени предсказуемости климатических условий во многих регионах мира.

Так, например, выявлена зависимость накопления снеготазпасов в Центральной Азии от влияния снежного покрова в Высокой Сибири. В зависимости от протяженности во времени и даты появления снежного покрова в Высокой Сибири, охлаждение территории этого региона приводит к образованию повышенного атмосферного давления над Евразией, препятствующего, таким образом, переносу воздушных масс с запада. В связи с этим количество осадков в

зимнее время уменьшается. Так как в питании рек Центральной Азии решающую роль играют талые воды сезонного снежного покрова, то можно оценить влияние этих климатических факторов на условия снегонакопления и оценить будущую водность.

Для прогноза количества атмосферных осадков в зимний и зимне-весенний период в Нарынском бассейне необходимо учитывать их зависимость от Арктической / Северо-Атлантической осцилляции, западного переноса воздушных масс, Высокой Сибири, Эль-Ниньо Южной осцилляции, температуры поверхности моря, и, в меньшей степени, муссонов.

Для расчета корреляционных зависимостей количества осадков в зимний период от перечисленных факторов был введен индекс SPI (Standard Precipitation Index), расчеты основаны на глобальных данных аномалий CRU за период 1968 – 2010 годы (рассчитанной для 2,5 градусов широты/долготы). Коэффициент корреляции данных аномалий CRU и климатических факторов составляет 0,71, коэффициент корреляции с проверочными прогнозами – 0,41. Расчеты производятся в R-program, куда загружаются данные с интернета, находящиеся в свободном бесплатном доступе.

Для градусной сетки 2,5 Центральная Азия имеет три кластера, при этом территория Нарынского бассейна и Кыргызстана попадает во 2-ой кластер (рис. 4.12).

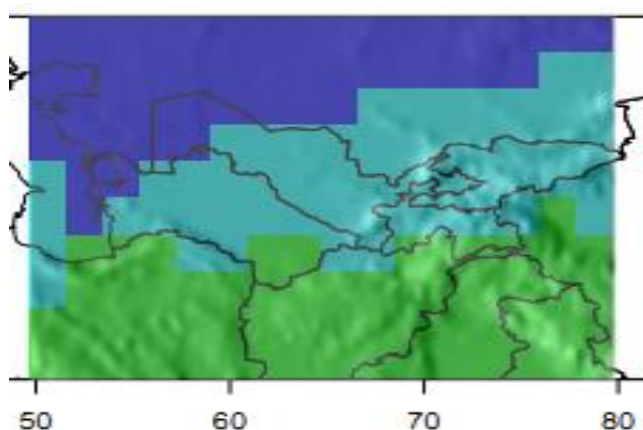


Рис. 4.12. Три кластера в глобальной модели CRU по территории Центральной Азии.

Так, например, при прогнозе аномалий осадков на зимний и зимне-весенний период 2017 года, составленном в октябре 2016 года, прослеживается тенденция на их увеличение за счет влияния Эль-Ниньо (красная линия, красный слой на рис. 4.13).

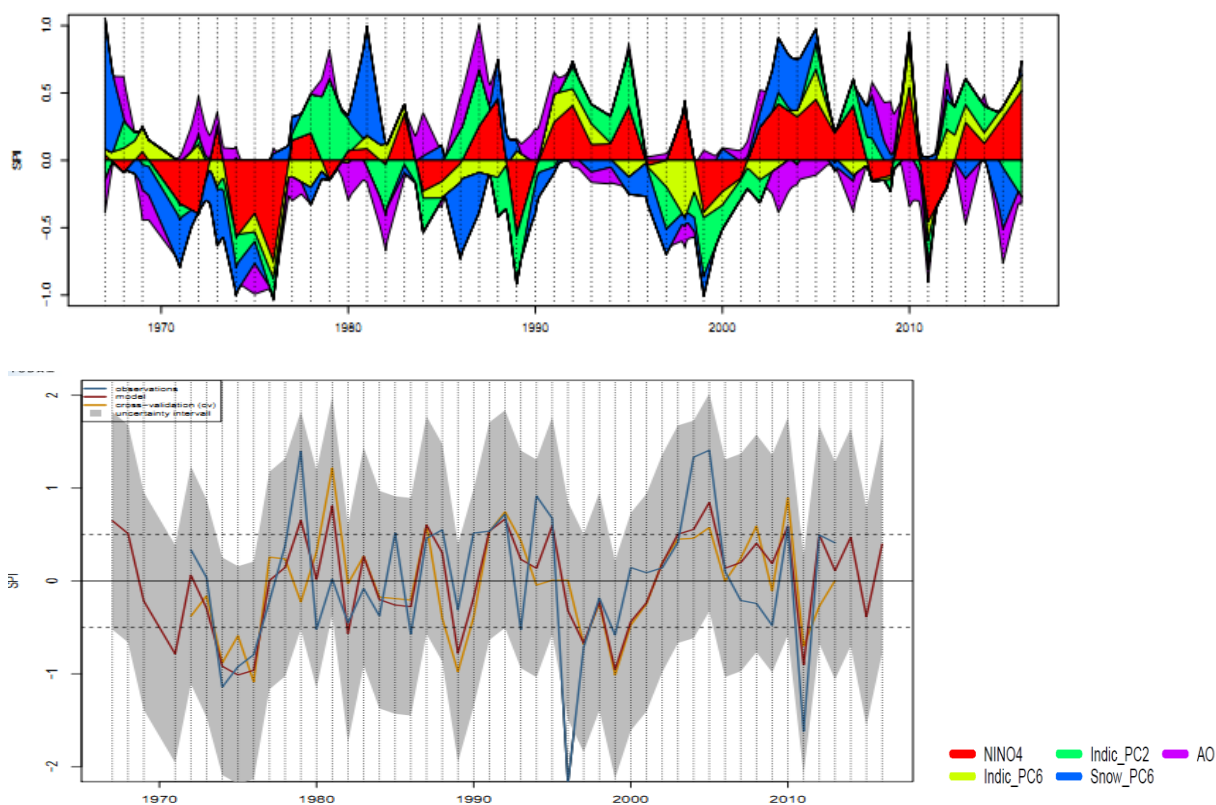


Рис. 4.13. Прогноз аномалий осадков на зимний и зимне-весенний период на основе индекса SPI (Standard Precipitation Index).

Прогноз водности на вегетационный период 2017 год, учитывая ситуацию в накоплении снега в горах за зимний период, был составлен в пределах средних многолетних величин. Однако, в мае 2017 года ситуация поменялась, количество осадков значительно превысило норму, в результате сток большинства рек Кыргызстана, в том числе и рек Нарынского бассейна, превысил норму.

Таким образом, учет ситуации, спрогнозированной в программе расчета гидрологической засухи, мог бы внести коррективы в прогноз, составленный до метеоситуации в мае и подготовить службы МЧС, водохозяйственные и энергетические к повышенному стоку рек.

4.5. Прогноз стока рек Нарынского бассейна и притока воды в Токтогульское водохранилище на месяцы сезонного снеготаяния (май-июль).

Большинство исследователей, занимающихся разработкой методик гидрологического прогнозирования на месяцы для горных рек Средней Азии, в качестве аргументов используют предшествующие расходы воды и метеоситуацию на водосборах рек (температуру воздуха и накопление осадков).

Нами был проведен анализ корреляционной зависимости среднемесячных расходов воды с площадью снежного покрова снимков MODIS (SCA – snow cover area), предшествующим стоком, предшествующей и будущей температурой воздуха, числом дней за период от перехода температуры воздуха через 0 °С к моменту составления прогнозов, например, до 1 мая для прогноза на май, до 1 июня для прогноза на июнь и т.д.

Соискатель учитывает переход температуры воздуха через 0 °С в сторону положительных температур на высокогорной метеостанции Тянь-Шань как отдельный аргумент, позволяющий определить начало таяния сезонного снега и ледников, уравнение 2.13 для расчета представлено в главе 2, подраздела 2.3.4. Применение в расчетах этого аргумента значительно улучшает качество составленной методики прогноза на месяцы снеготаяния. Кроме того, в качестве аргумента используется и температура воздуха за предшествующий и будущий месяц по метеостанции Тянь-Шань. В качестве предикторов для прогноза стока на май использовались два параметра – предшествующий сток и площадь снежного покрова в нижнем течении реки, температура воздуха на май и площадь снежного покрова в верхнем течении. Для прогноза стока реки на июнь использовались три предиктора – предшествующий сток, площадь снежного покрова и число дней с положительной температурой воздуха, как в нижнем, так и в верхнем течении реки Нарын. Для прогноза стока реки на июль в верхнем и нижнем течении использовались два предиктора – площадь снежного покрова и предшествующий сток, для верхнего течения реки Нарын дополнитель-

но использовалась температура воздуха за прошедший месяц (июнь) (Рис. 4.14, 4.15 и 4.16).



Рис. 4.14. График хода расходов воды, притекающего в Токтогульское вдхр. на июнь (1) фактического и спрогнозированных по уравнениям 2.11 (2) и 2.13 (3).

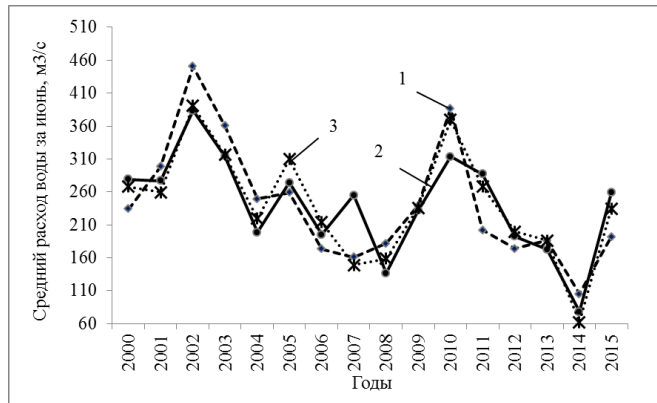


Рис. 4.15. График хода расходов воды по р.Нарын-г.Нарын на июнь (1) фактического и спрогнозированных по уравнениям 2.11 (2) и 2.13 (3).

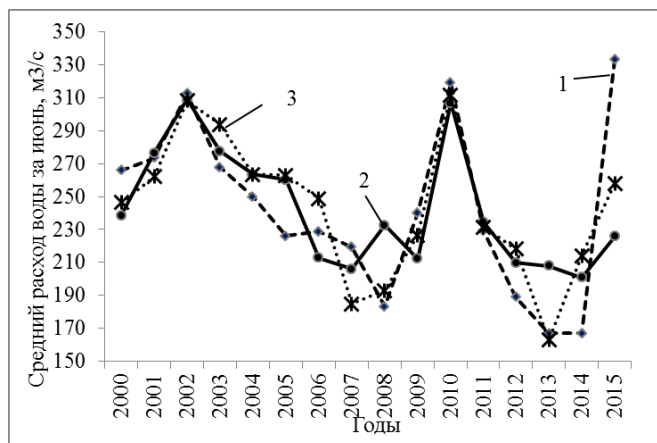


Рис. 4.16. График хода расходов воды по р.Нарын-г.Нарын на июль (1) фактического и спрогнозированных по уравнениям 2.11 (2) и 2.12 (3).

Уравнения и характеристики качества методики размещены в таблице 4.11.

Таблица 4.11. Уравнения для долгосрочного прогноза расхода воды реки Нарын и притока воды в Токтогульское водохранилище на месяцы сезонного снеготаяния.

| № | Название объекта | Расчетное уравнение | R ² | S/σ | Обеспеченность допустимой погрешности в % |
|-------------|------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------|------|-------------------------------------------|
| Май | | | | | |
| 1 | Приток в Токтогульское вдхр. | $4,38*Q_3 + 2,84*S_{sn_110} - 342$ | 0,43 | 0,75 | 63 |
| 2 | р.Нарын – с.Уч Терек | $4,32*Q_3 + 3,5*S_{sn_110} - 402$ | 0,41 | 0,75 | 63 |
| 3.1 | р.Нарын – г. Нарын | $1,25*S_{sn_110} + 70$ | 0,33 | 0,79 | 63 |
| 3.2 | р.Нарын – г. Нарын | $23,7*T_5 + 2,3*S_{sn_110} + 3,2$ | 0,55 | 0,67 | 68 |
| Июнь | | | | | |
| 4.1 | Приток в Токтогульское вдхр. | $4,78*Q_3 + 26,4*S_{sn_140} - 524$ | 0,49 | 0,72 | 56 |
| 4.2 | Приток в Токтогульское вдхр. | $20*T_{nd} + 1,53*Q_3 + 13,1*S_{sn_140} - 2358$ | 0,76 | 0,49 | 88 |
| 5.1 | р.Нарын – с.Уч Терек | $0,59*Q_{2дек.5} + 23,6*S_{sn_140} - 23$ | 0,55 | 0,67 | 68 |
| | | | | | |
| 5.2 | р.Нарын – с.Уч Терек | $20,6*T_{nd} + 0,32*Q_{2дек.5} + 6,7*S_{sn_140} - 2235$ | 0,76 | 0,49 | 75 |
| 6.1 | р.Нарын – г. Нарын | $0,72*Q_{2дек.5} + 5,16*S_{sn_140} - 59,7$ | 0,67 | 0,57 | 69 |
| 6.2 | р.Нарын – г. Нарын | $4,84*T_{nd} + 0,76*Q_{2дек.5} + 3,0*S_{sn_140} - 634$ | 0,82 | 0,42 | 88 |
| Июль | | | | | |
| 7 | Приток в Токтогульское вдхр. | $0,60*Q_{2дек.6} + 2,82*S_{sn_170} + 182$ | 0,78 | 0,47 | 100 |
| 8 | р.Нарын – с.Уч Терек | $0,60*Q_{2дек.6} + 0,61*S_{sn_170} + 186$ | 0,77 | 0,48 | 81 |
| 9.1 | р.Нарын – г. Нарын | $0,34*Q_{2дек.6} + 1,17*S_{sn_170} + 175$ | 0,48 | 0,72 | 88 |
| 9.2 | р.Нарын – г. Нарын | $0,48*T_6 - 38,6*Q_{2дек.6} - 3,7*S_{sn_170} + 310$ | 0,67 | 0,58 | 88 |

Удовлетворительное качество методики прогноза на май S/σ было в пределах 0,67 – 0,79, обеспеченность допустимой погрешности 63-68 %. Хорошее качество методики прогноза на июнь S/σ – 0,42 – 0,72, обеспеченность допустимой погрешности – 56-88 %. Хорошее качество методики прогноза на июль S/σ – 0,47 – 0,72, обеспеченность допустимой погрешности 81-100 %.

Следует отметить, что в прогностических уравнениях на месяцы было предложено по два варианта расчета прогноза. Вариант с тремя предикторами, где используется температура воздуха для прогноза стока на май и июль в створе г.Нарын можно использовать при температурных аномалиях, учет числа дней с положительными температурами воздуха значительно улучшил качество методики прогноза на июнь для верхнего и нижнего течения реки Нарын.

Кроме площади снежного покрова для разработки методик прогноза водности реки Нарын был использован индекс снежного покрова (SCI – snow cover index), который оказался значительно эффективнее, но более трудоемкий в расчетах. Индекс SCI или индекс снежного покрова был применен для прогноза стока рек Средней Азии [131]. Разработанная нами методика для реки Нарын в створах г.Нарын и с.Уч-Терек показала высокую эффективность на месяцы с июня по сентябрь [132, 133].

При разработке методики нами были использованы данные снежного покрова снимков MODIS, обработанных в программе MODSNOW-Tool и рассчитана за каждые сутки площадь снежного покрова в процентном соотношении к площади бассейна (SCA, snow cover area) для высотных зон с интервалом в 500 метров (Рис. 4.17).

Далее для получения информации о продолжительности накопления снежного покрова был рассчитан индекс SCI (snow cover index), для оценки общего числа дней со снежным покровом для бассейна реки Нарын по уравнению 2.14 (см. главу 2, подраздел 2.3.4).

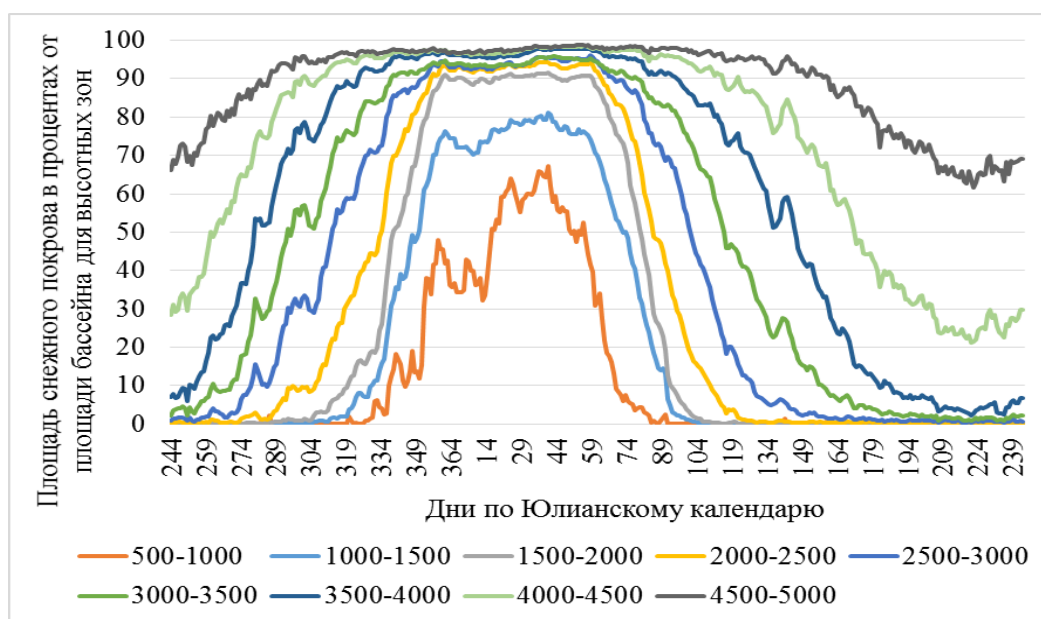


Рис. 4.17. Динамика площади снежного покрова (SCA) в процентах от площади бассейна по высотным зонам на примере бассейна реки Нарын – с.Уч-Терек.

Наиболее высокие коэффициенты корреляции средних месячных расходов воды с индексом SCI, $R = 0,70-0,80$, для реки Нарын в створе с.Уч-Терек были в месяцы июнь, июль, август и сентябрь, в створе г.Нарын – в июне и июле. В апреле и мае для обоих створов и в августе и сентябре для створа г.Нарын коэффициенты корреляции были ниже, $R = 0,50-0,64$ (Таб.4.12 и 4.13).

Таблица 4.12. Результаты расчетов коэффициентов корреляции средних месячных расходов воды реки Нарын – с.Уч-Терек с индексом SCI по высотным зонам.

| месяцы | Высотные зоны | | | | | | | | |
|----------|---------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 500-1000 | 1000-1500 | 1500-2000 | 2000-2500 | 2500-3000 | 3000-3500 | 3500-4000 | 4000-4500 | 4500-5000 |
| Апрель | 0,12 | 0,22 | 0,18 | 0,15 | 0,15 | 0,30 | 0,49 | 0,59 | 0,63 |
| Май | 0,50 | 0,44 | 0,31 | 0,26 | 0,25 | 0,30 | 0,36 | 0,35 | 0,25 |
| Июнь | 0,26 | 0,45 | 0,46 | 0,45 | 0,58 | 0,71 | 0,79 | 0,73 | 0,62 |
| Июль | 0,16 | 0,39 | 0,45 | 0,49 | 0,57 | 0,70 | 0,79 | 0,74 | 0,60 |
| Август | 0,25 | 0,37 | 0,37 | 0,35 | 0,40 | 0,51 | 0,70 | 0,76 | 0,68 |
| Сентябрь | -0,03 | 0,20 | 0,25 | 0,29 | 0,42 | 0,60 | 0,74 | 0,80 | 0,78 |

Таблица 4.13. Результаты расчетов коэффициентов корреляции средних месячных расходов воды реки Нарын – г.Нарын с индексом SCI по высотным зонам.

| месяцы | Высотные зоны | | | | | |
|----------|---------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2000-2500 | 2500-3000 | 3000-3500 | 3500-4000 | 4000-4500 | 4500-5000 |
| Апрель | 0,01 | 0,09 | 0,24 | 0,34 | 0,51 | 0,56 |
| Май | 0,41 | 0,53 | 0,58 | 0,63 | 0,61 | 0,48 |
| Июнь | 0,36 | 0,59 | 0,72 | 0,80 | 0,77 | 0,67 |
| Июль | 0,41 | 0,57 | 0,57 | 0,70 | 0,71 | 0,55 |
| Август | 0,36 | 0,42 | 0,48 | 0,59 | 0,64 | 0,58 |
| Сентябрь | 0,07 | 0,24 | 0,34 | 0,38 | 0,50 | 0,59 |

Наибольшие коэффициенты корреляции средних месячных расходов воды с индексом SCI были с высотными зонами 3000-4500 м.н.у.м., на сентябрь – 4500-5000, на май – 500-1000 м.н.у.м. (в створе с.Уч-Терек). Но, следует отметить, что в апреле и мае на сток реки Нарын большое влияние оказывают дожди, которые накладываются на талый снеговой сток, в связи с этим, зависимости стока от индекса снежного покрова имеют низкий коэффициент корреляции. В месяцы с июня по сентябрь осадков выпадает незначительное количество и сток реки формируется в основном за счет таяния снега и ледников. Но, если для створа с.Уч-Терек площадь ледников занимает около 1 % площади бассейна, то в створе г.Нарын – 5 % площади бассейна. Поэтому коэффициент корреляции стока за месяцы август и сентябрь ниже, сток которых в большей степени зависит от температуры воздуха, определяющей интенсивность таяния ледников. Анализ наилучших результатов тесноты зависимости средних месячных расходов воды и индекса SCI по высотным зонам позволяет составить уравнения линейной зависимости для прогноза водности рек (Таблица 4.14). Обеспеченность допустимой погрешности по гидропосту с.Уч-Терек за период 2000-2017 г.г. составила от 41 % до 88 %. Наиболее низкая обеспеченность допустимой погрешности оказалась за апрель и май – в пределах 41-47 %, наиболее высокая в период июнь – сентябрь – 71-88 %. Обеспеченность допустимой погрешности по гидропосту г.Нарын за период 2000-2017 г.г. составила 53 – 76 %.

Таблица 4.14. Уравнения линейной зависимости средних месячных расходов воды от индекса снежного покрова SCI по высотным зонам.

| Месяцы | Высотная зона | Уравнения | Коэффициент корреляции (R) | Обеспеченность допустимой погрешности, % |
|---------------------------|---------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------------------|
| Для гидропоста с.Уч-Терек | | | | |
| Апрель | 4000-4500 | $234.22SCI_{9.3} + 172.01$ | 0,59 | 47 |
| Май | 500-1000 | $385.09SCI_{9.4} + 445.55$ | 0,50 | 41 |
| Июнь | 3500-4000 | $843.5SCI_{9.5} + 393.73$ | 0,79 | 82 |
| Июль | 3500-4000 | $615.4SCI_{9.6} + 389.1$ | 0,79 | 82 |
| Август | 4000-4500 | $368.36SCI_{9.7} + 318.24$ | 0,76 | 71 |
| Сентябрь | 4000-4500 | $162.86SCI_{9.8} + 241.33$ | 0,80 | 88 |
| Для гидропоста г.Нарын | | | | |
| Апрель | 4500-5000 | $39.641SCI_{9.3} + 40.335$ | 0,56 | 59 |
| Май | 3500-4000 | $94.987SCI_{9.4} + 86.544$ | 0,63 | 71 |
| Июнь | 3500-4000 | $284.87SCI_{9.5} + 84.356$ | 0,80 | 59 |
| Июль | 4000-4500 | $156.9SCI_{9.6} + 149.99$ | 0,71 | 76 |
| Август | 4000-4500 | $109.08SCI_{9.7} + 147.22$ | 0,64 | 53 |
| Сентябрь | 4500-5000 | $35.471 SCI_{9.8} + 87.654$ | 0,59 | 65 |

Для засушливого района верховьев реки Нарын, информация о его стоке в летние месяцы особенно важна в целях предупреждения наводнений и подтоплений, а также гидрологических засух, которые отмечаются в период с июня по август, что важно для планирования водных ресурсов [127, 133, 134].

Расчеты линейной зависимости средних месячных расходов воды по реке Нарын – г.Нарын показали статистически значимую зависимость с площадью снежного покрова по высотным зонам (рис. 4.18) [133]:

- на июнь с высотной зоной 3500-4000 м.н.у.м., $R^2 = 0,64$;
- на июль с высотной зоной 3500-4000 м.н.у.м., $R^2 = 0,49$;
- на август высотной зоной 4000-4500 м.н.у.м., $R^2 = 0,41$.

Таким образом, оценка площади снежного покрова, проведенная в конце предыдущего месяца, позволяет сделать прогноз на текущий месяц и предупредить об ожидаемых гидрологических засухах или наводнениях.

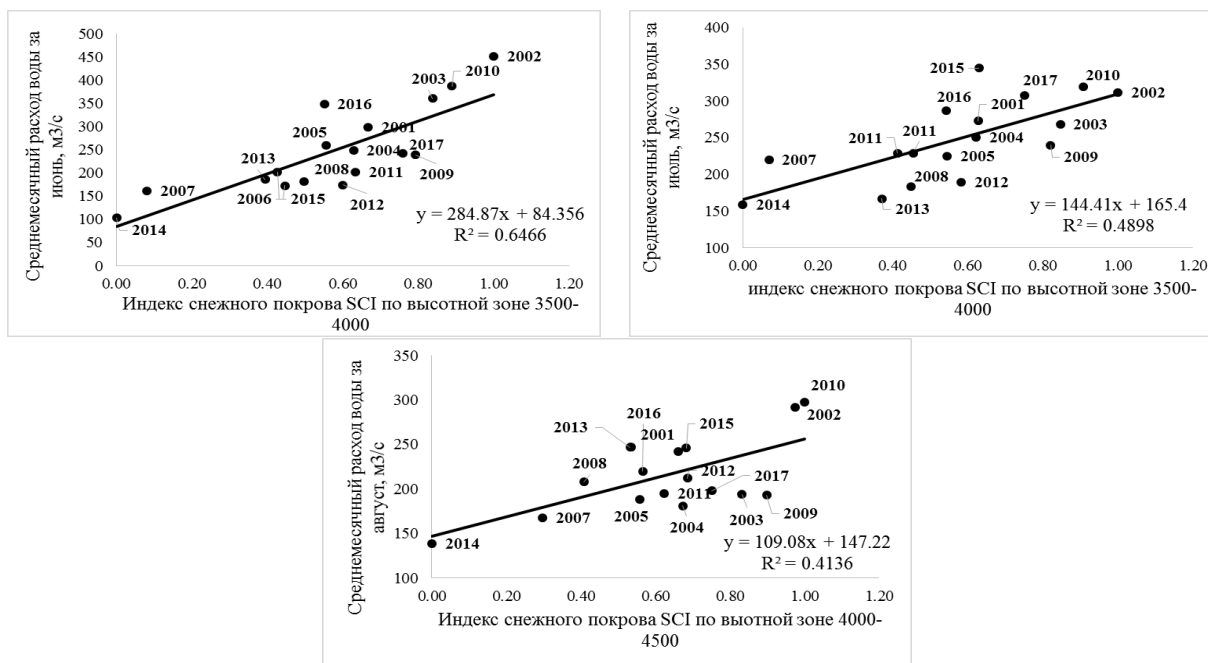


Рис. 4.18. Линейные зависимости среднего месячного стока р.Нарын – г.Нарын с площадью снежного покрова по высотным зонам.

Например, на реке Нарын в 2002 и 2010 годах площадь снега была выше средних значений за период 2000-2017 г.г., и водность также была значительно выше средних многолетних величин, что позволяет предупредить о высоких уровнях воды и возможных наводнениях. И, наоборот, в 2007 и 2014 годах площадь снега была ниже средних значений за период 2000-2017 г.г. и, соответственно, эти годы были маловодными, что указывает на недостаток воды для сельскохозяйственных нужд и ожидании гидрологической засухи в летние месяцы, когда речная вода используется для полива [133].

Проверочные прогнозы по независимому 2018 году показали хорошую оправдываемость прогнозов (Таб.4.15). По створам с.Уч-Терек и г.Нарын, все прогнозы оправдались за исключением прогнозов расхода воды на май. Однако, синоптическая ситуация в мае, частые северо-западные, западные и северные вторжения с похолоданиями, ливневыми осадками и предфронтальным выносом тепла, вносит изменения в процессы снеготаяния. Соответственно, в мае прогнозы стока на большинстве горных рек Кыргызстана часто носят консультативный характер и не оправдываются. В сентябре прогноз стока по створу с.Уч-Терек также не оправдался, но расходы воды по гидропосту за август и

сентябрь были восстановлены по балансу Токтогульского водохранилища, т.к. на гидропосту наблюдались подпорные явления от наполненного водохранилища.

Таблица 4.15. Оправдываемость прогнозов расхода воды на месяцы вегетации за 2018г.

| Месяцы | Фактический расход воды, м ³ /с | Аргумент SCI на 2018г. | Допустимая погрешность прогноза, м ³ /с | Спрогнозированный расход воды, м ³ /с | Оправдываемость за 2018г. |
|---------------------------|--------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|
| Для гидропоста с.Уч-Терек | | | | | |
| Апрель | 302 | 0,62 | 53,0 | 264 – 370 | оправдался |
| Май | 484 | 0,44 | 108,7 | 507 – 725 | не оправдался |
| Июнь | 840 | 0,68 | 186,4 | 780 – 1152 | оправдался |
| Июль | 897 | 0,67 | 147,4 | 656 – 950 | оправдался |
| Август | 476* | 0,63 | 80,3 | 498 – 604 | оправдался |
| Сентябрь | 285* | 0,63 | 44,3 | 299 – 388 | не оправдался |
| Для гидропоста г.Нарын | | | | | |
| Апрель | 55,9 | 0,52 | 11,2 | 50 – 72 | оправдался |
| Май | 114 | 0,60 | 28,1 | 115 – 172 | не оправдался |
| Июнь | 225 | 0,62 | 48,0 | 212 – 308 | оправдался |
| Июль | 268 | 0,61 | 40,6 | 205 – 286 | оправдался |
| Август | 212 | 0,61 | 26,3 | 187 – 240 | оправдался |
| Сентябрь | 92,6 | 0,53 | 14,5 | 92 - 121 | оправдался |

Примечание: *– расходы воды по гидропосту с.Уч-Терек ориентировочные, восстановленные по балансу Токтогульского водохранилища).

Краткие выводы к главе 4.

Продолжительность и максимальная высота снежного покрова по данным репрезентативной метеостанция Тянь-Шань оказывает непосредственное влияние на сток рек в период половодья. Были рассчитаны уравнения линейной зависимости стока рек на период половодья от количества дней со снежным покровом за холодный период (сентябрь-апрель).

В качестве предиктора для составления прогноза стока на реках Нарынского бассейна на период половодья были использованы данные спутниковых снимков MODIS, обработанные в программе MODSNOW-Tool. Были рассчита-

ны уравнения множественной линейной регрессии с двумя предикторами: с площадью снежного покрова и с предшествующим стоком. Использовался также третий предиктор – температура воздуха за летний период в расчетных уравнениях для верховьев реки Нарын – г.Нарын, имеющей значительную долю ледникового питания.

Метод, использующий данные о площади снежного покрова MODIS для прогнозирования водности притоков реки Нарын, на которых отсутствуют наблюдения за стоком с 1990-ых годов, показал свою эффективность для предупреждения таких экологических рисков как наводнения или гидрологическая засуха. Проведенные нами исследования показали, что предложенный здесь метод может быть применен как для рек снегово-ледникового питания, сток рек которых формируется в основном за счет талых вод сезонного снега, так и для рек ледниково-снегового питания, со значительной долей талого ледникового стока.

Использование операционной системы R-program расширяет возможности применения различных методологий для составления качественного и надежного гидрологического прогноза на вегетационный период. Однако, ее недостаток – для реализации расчетов в программе требуется суточная информация о площади снежного покрова, рассчитанная за период наблюдений с 2000 г. по текущее время.

Прогноз гидрологической засухи на зимне–весенний период, составленный в ноябре, дает предпосылки для оценки возможной экстремальной водности заранее, что повышает эффективность гидрологических прогнозов.

Спутниковая информация о снежном покрове снимков MODIS также была использована для разработки методики прогноза водности рек на месяцы вегетации. В качестве аргументов использовались данные о площади снежного покрова (SCA) и индекса снежного покрова (SCI), учитывающего продолжительность залегания (количества дней) снежного покрова. Индекс снежного покрова (SCI – snow cover index) оказался значительно эффективнее, но более трудоемкий в расчетах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Составленная матрица корреляции среднегодовых и средних за вегетационный период расходов воды с метеопараметрами показала, что наибольшее влияние на сток оказывают атмосферные осадки за холодный период времени, температура воздуха за весенний и осенний периоды и даты перехода температур воздуха через 0 °С в сторону положительных значений.

2. За многолетний период 1945 по 2015 гды проведен анализ влияния климатических изменений на сток реки Нарын. Было доказано, что повышение стока реки Нарын на 113-121 % и изменение его водного режима внутри года связано с изменениями климатических параметров. Так, за период с 1973 по 2015 годы в сравнении с периодом за 1945-1972 годы, температура воздуха за весенний и осенний периоды повысилась на 0,8-1,5 °С, а суммарное количество осадков за холодный период времени – на 5-12 %. Даты перехода температуры воздуха через 0 °С в сторону положительных температур отмечаются на 10 дней раньше, а в сторону отрицательных – на 15 дней позже, повысилась также сумма положительных температур воздуха с 2500 до 3000 °С. Можно ожидать, что при сложившейся тенденции паводки на реке Нарын будут проходить на 10-15 дней раньше, и более значительную роль в питании реки будут иметь сезонные запасы снега.

3. Этот факт подтверждает также проведенное исследование компонентов стока по методу расчленения гидрографа. Так за период 1992 по 2016 годы доля талого ледникового стока понизилась на 7-8 %, а талого снегового стока увеличилась на 5-12 % в годовом стоке. Объем талого снегового стока увеличился в 1,6-2,3 раза, что связано как с общей тенденцией увеличения осадков за холодный период, так и с условиями накопления снегозапасов за холодный период, в частности в 2016 году по сравнению с 1992 годом. Объем талого ледникового стока за тот же период увеличился на 20 % в верховье реки Нарын, но понизился на 8 % в нижнем течении реки Нарын. Увеличение меженного стока реки на

30-40 % связано также с увеличением поступления талых вод сезонного снега и ледников, а также с увеличением продолжительности теплого периода.

4. Впервые для прогноза стока рек Нарынского бассейна и притока воды в Токтогульское водохранилище был проведен его корреляционный анализ с продолжительностью залегания и максимальной высотой снежного покрова по данным метеостанций Кыргызгидромета. Уравнения линейной зависимости стока рек Нарынского бассейна с количеством дней со снежным покровом за холодный период по выявленной репрезентативной метеостанции Тянь-Шань, позволяют составлять достоверный долгосрочный гидрологический прогноз.

5. Разработанная методика прогноза водности рек Нарынского бассейна и притока воды в Токтогульское водохранилище на вегетационный период и на период май-сентябрь по данным снежного покрова снимков MODIS соответствует критериям качества хорошая и удовлетворительная. Результаты расчета проверочных прогнозов для многоводных и маловодных лет, а также для проверочных 2017-2019 годов показали высокую – 100 % оправдываемость. Хорошее качество методики на месяцы вегетации, составленной на основе данных о площади и продолжительности залегания снежного покрова снимков MODIS, было выявлено: на май – июль с учетом площади, и июнь-сентябрь с учетом продолжительности залегания снежного покрова. Оправдываемость проверочных прогнозов за 2018 г. составила 75 %. Методика эффективна для рационального использования водных ресурсов в ИУВР.

6. Метод, использующий данные о площади снежного покрова MODIS для прогнозирования водности притоков реки Нарын, на которых отсутствуют наблюдения за стоком с 1990-ых годов Ат-Башы, Алабуга и Торкент, показал хорошие результаты для оценки ожидаемых опасных гидрологических явлений (наводнений или гидрологической засухи). Предупреждение опасных гидрологических явлений, таких как наводнения или гидрологическая засуха являются важными для уменьшения экологических рисков и принятия мер по предотвращению их последствий или сокращению степени их воздействия.

7. Использование операционной системы R-program показало свою эффек-

тивность в прогнозировании стока реки Нарын для составления качественного и надежного гидрологического прогноза на вегетационный период. Качество составленной методики соответствует критериям хорошей. Оправдываемость прогнозов в экстремальные по водности, а также в проверочные (2017-2019) годы составила 100 %.

8. Прогноз гидрологической засухи на зимне–весенний период, составленный в инструментах R-program, в ноябре, дает возможность прогноза экстремальной водности на вегетационный период с большой заблаговременностью.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Методика прогнозов водности рек Нарынского бассейна на долгосрочный период (вегетационный период, уточнение на вегетацию, прогнозы на период половодья и на месяцы вегетации) была внедрена в систему Кыргызгидромета в 2015 году и прошла тестирование на последующих проверочных годах за период 2016-2019 гг. Качество методики и степень достоверности прогнозов позволяют составлять прогнозы водности реки Нарын, притока воды в Токтогульское водохранилище в оперативном режиме.

Прогнозы, составленные по этой методике, направляются в правительственные структуры, заинтересованным водохозяйственным организациям, энергетическим компаниям и МЧС, что позволяет им научно обоснованно и своевременно решать задачи интегрированного управления водными ресурсами, принимать превентивные мероприятия по предупреждению экстремальной водности (многоводья или маловодья предстоящего вегетационного периода и его месяцы).

Методика, основанная на применении спутниковых изображений MODIS, обработанных в программе MODSNOW-Tool позволяет получать информацию в реальном масштабе времени и дает пространственную характеристику распределения снежного покрова в бассейне реки. Используя успешный опыт использования методики в Кыргызгидромете, программа MDSNOW-Toll в следу-

ющие годы была внедрена в других Национальных гидрометслужбах стран Центральной Азии (Узгидромете, Казгидромете и Таджгидромете).

Методы долгосрочного гидрологического прогнозирования на основе спутниковой информации снимков MODIS, предложенные соискателем уже успешно апробированы для других бассейнов рек Сыр-Дарьи и Амударьи и в перспективе результаты исследовательской работы могут использоваться в оперативном гидрологическом прогнозировании всех Национальных гидрометслужбах Центральной Азии, что позволит значительно сократить время на сбор информации о запасах снега в горах и выпуск гидрологических прогнозов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бассейн реки Нарын. Физико-географическая характеристика [Текст] / [Благообразов В.А., Бондарев Л.Г., Кожевникова Н.Д. и др.]. – Фрунзе: Академия Наук Киргизской ССР, 1960. – 230 с.
2. **Щеглова, О.П.** Питание рек Средней Азии [Текст] / О.П. Щеглова. – Ташкент: СамГУ, 1960. – 245 с.
3. **Шульц, В.Л.** Реки Средней Азии. [Текст] / В.Л. Шульц. – Л.: ГИМИЗ, 1965. – 680 с.
4. **Ресурсы поверхностных вод СССР. Средняя Азия.** [Текст]: Л.: Гидрометеиздат, 1969. – Т. 14. Вып.1. – 440с.
5. **Маматканов, Д.М.** Водные ресурсы Кыргызстана на современном этапе [Текст] / Д.М. Маматканов, Л.В.Бажанова, В.В. Романовский. – Бишкек: Илим, 2006. – 266 с.
6. **Шульц, В.Л.** Принципы и схемы гидрологического районирования Средней Азии [Текст] / В.Л. Шульц. – Самарканд – Ташкент: УЕГМС Средней Азии, 1935. – 58 с.
7. **Шульц, В.Л.** К вопросу о классификации рек Средней Азии по типу их питания [Текст] / В.Л. Шульц. – Ташкент: Бюлл. АН Уз.СССР, 1944. – № 5. – С. 25-34
8. **Большаков, М.Н.** Водные ресурсы советского Тянь-Шаня и методы их расчета [Текст] / М.Н. Большаков. – Фрунзе: Илим, 1974. – 306 с.
9. **Львович, М.И.** Опыт классификации рек СССР [Текст] / М.И. Львович. – М.: Труды ГГИ, 1938. – вып. № 6. – С.15-21.
10. **Кеммерих, А.О.** Роль ледников в стоке рек Средней Азии [Текст] / А.О. Кеммерих // Материалы гляциологических исследований. М.: АНСССР. – 1972. – Вып. № 20. – С.82-94.

11. **Диких, А.Н.**, Михайлова В.И. Режим ледников и водный баланс северного склона хребта Терской-Ала-Тау [Текст] / А.Н. Диких, В.И. Михайлова. – М.: Наука. 1976. – 131 с.
12. **Аламанов, С.К.** Исследование формирования и долгосрочный прогноз стока рек Северо-Запада Киргизии [Текст]: автореф. дис. к. геогр. наук: С.К.Аламанов. – Москва, 1977. – 28 с.
13. **Эргешев, А.А.** Водный баланс Кыргызстана / А.А. Эргешев, И.Д. Цигельная, М.А. Музакеев. – Бишкек: Илим, 1992. – 152 с.
14. **Бажанова, Л.В.**, Сатылканов Р.А., Эрменбаев Б.О. Динамика оледенения в условиях современного изменения климата на примере ледника Кара-Баткак, хребет Тескей Ала-Тоо [Текст] / Л.В. Бажанова, Р.А. Сатылканов, Б.О. Эрменбаев // Вестник КРСУ. – 2017. № 17 (5). – С. 189-194.
15. **Бажанова, Л.В.** Влияние изменений климата на гидрологический режим рек высокогорной зоны (на примере р.Кашка-Тор в бассейне озера Иссык-Куль) [Текст] / Л.В. Бажанова // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – 2018. – №3. – С. 186-191.
16. **Коновалов, В.Г.** Расчет региональных характеристик режима ледников по модели с распределенными параметрами. Материалы гляциологических исследований [Текст] / В.Г. Коновалов, Л.М. Карандаева // Материалы гляциологических исследований. – М. – 1993. – № 77. – С.17-23.
17. **Коновалов В.Г.** Таяние и сток с ледников в бассейнах рек Центральной Азии [Текст] / В.Г. Коновалов. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 237 с.
18. **Коновалов В.Г.** Расчет и прогноз составляющих стока в бассейнах рек Центральной Азии [Текст] / В.Г. Коновалов // Известия РАН. – 2015. №3. – С.722-84.
19. **Диких, А.Н.** Ледниковый сток Тянь-Шаня и его роль в формировании общего стока [Текст] / А.Н. Диких // Материалы гляциологических исследований. – М. – 1993. – № 77. – С.41-49.

20. **Диких, А.Н.** Ледниковый сток реки Нарын и сценарий возможного его изменения при потеплении климата [Текст] / А.Н. Диких // Известия НАН КР. – Бишкек. – 1999. – С.74-79.
21. **Подрезов, О.А.** Изменчивость климатических условий и оледенения Тянь-Шаня за последние 100 лет [Текст] / О.А. Подрезов, А.Н. Диких, К.Б. Бакиров // Вестник КРСУ. – 2001. – № 1 (3). – С.33-40.
22. **Aizen, V.B.** Climatic and Hydrologic Changes in the Tien-Shan, Central Asia [Text] / V.B. Aizen, E.M. Aizen, J.M. Melak, J. Dosier // Journal of climate. – 1997. – № 10. p. 1393-1404.
23. Книжки и таблицы для записи метеорологических наблюдений (ТМ-1, ТМС-84, КМ-1) с 1945 по 2017 годы [Текст]. Фонды Кыргызгидромета, л. 72
24. Таблицы о состоянии снежного покрова (КМ-1) с 2000 по 2017 годы [Текст]. Фонды Кыргызгидромета, л. 18.
25. Гидрологические ежегодники за 1940 – 2019 годы [Текст]. Фонды Кыргызгидромета, л. 80.
26. **Джорджио, З.В.** Межень на реках Средней Азии [Текст] / З.В. Джорджио // Труды ТГО. – 1955. – № 10. – С. 24-36.
27. **Джорджио, З.В.** Опыт долгосрочных прогнозов стока рек Средней Азии [Текст] / З.В. Джорджио. – Ташкент: САГУ, 1957. – с. 112.
28. **Джорджио, З.В.** К итогам снегомерных работ в Средней [Текст] / З.В. Джорджио // Труды ТГО. – 1955. – № 10. – С. 54-67.
29. **Абальян, Т.С.** Прогноз месячного стока рек Средней Азии [Текст] / Т.С.Абальян // Труды ЦИП. – 1961. – № 113. – С.3-54.
30. **Абальян, Т.С.** О распределении стока рек Средней Азии в течение вегетационного периода [Текст] / Т.С.Абальян // Труды ЦИП. – 1961. – № 99. – С. 80-96.
31. **Боровикова, Л.Н.** Математическое моделирование процесса стока горных рек [Текст] / Л.Н. Боровикова, Ю.М. Денисов, Е.Б. Трофимова, И.Д. Шенцис. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 152 с.

32. **Абальян, Т.С.** Методика прогноза объема стока за вегетационный период рек Северной Киргизии на участках с естественным режимом [Текст] / Т.С. Абальян // Научный отчет. – М.: ГУГС. – 1956. – 203 с.
33. **Гирник, Е.И.** Долгосрочные прогнозы стока по рекам бассейна Сырдарьи в условиях искусственно - измененного их режима [Текст] / Е.И. Гирник. – Ташкент: САРНИГМИ. – 1971. – 208 с.
34. **Бажанова, Л.В.** Методика прогноза притока воды в Токтогульское водохранилище (на межень, вегетационный, кварталный, месячный и декадный периоды) [Текст] / Л.В. Бажанова. – Фрунзе: ГКСССР. – 1979. – с. 160.
35. **Калашникова, О.Ю.** К вопросу о гидрологических прогнозах горных рек на весенне-летний период [Текст] / О.Ю. Калашникова // Метеорология и гидрология в Кыргызстане: сб.науч.тр. – Бишкек: КРСУ. – 2003. – с.14-22.
36. **Карамолдоев, Ж.Ж.** Прогноз притока воды в Токтогульское водохранилище на вегетационный период [Текст] / Ж.Ж. Карамолдоев, О.Ю. Калашникова // Вестник БГУ. – Бишкек – 2012. – №3 (23). – С.25-31.
37. **Аполлов, Б.А.** Курс гидрологических прогнозов [Текст]: учебник для вузов / Б.А. Аполлов, Г.П. Калинин, В.Д. Комаров. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 419 с.
38. **Попов, Е.Г.** Гидрологические прогнозы [Текст]: учебник для техникумов / Е.Г. Попов. – Л.: Гидрометеиздат. – 1979. – 256 с.
39. **Заварина, М.В.** Строительная климатология [Текст] / М.В. Заварина. – Л.: Гидрометеиздат. – 1976. – 312 с.
40. **Подрезов, О.А.** Горная метеорология и климатология [Текст] / О.А. Подрезов. Бишкек: КРСУ. – 2008. – 348 с.
41. **СНИП 2.01.07 -85.** Нагрузки и воздействия. [Текст] – М.: Стройиздат. – 1983. – 68 с.
42. **Подрезов, О.А.** Горная климатология и высотная климатическая зональность Кыргызстана [Текст]/ О.А. Подрезов. – Бишкек: КРСУ. – 2014. – 169 с.
43. **Важнов, А.Н.** Анализ и прогноз стока рек Кавказа [Текст] / А.Н. Важнов. – М.: Гидрометеиздат. – 1966. – 275 с.

44. **Шенцис, И.Д.** Линейные модели бассейновой трансформации стока [Текст] / И.Д. Шенцис, Э.К. Шпигунова // Труды САНИГМИ. – Л.: Гидрометеиздат. – 1970. – № 52. 85 с.
45. **Мухин, В.М.** Методические указания к разработке метода краткосрочного прогноза расходов воды горных рек на основе математической модели формирования стока (на примере реки Карадарьи) [Текст] / В.М. Мухин, А.Я. Полуниин. – М.: Гидрометеиздат. – 1982. – 148 с.
46. **Глазырин, Г.Е.** Фазовое состояние осадков в горах в зависимости от приземной температуры воздуха [Текст] / Г.Е. Глазырин // Метеорология и гидрология. – 1970. – № 1. - С. 30-34.
47. **Денисов, Р.М.** Схема расчета гидрографа стока горных рек [Текст] / Р.М. Денисов. – Л.: Гидрометеиздат. – 1965. – 295 с.
48. **Боровикова, Л.Н.** Статистические методы прогноза стока горных рек [Текст] / [Л.Н. Боровикова, А.Г. Гриневич, А.М. Овчинников и др.] // Труды САНИГМИ. – Л.: Гидрометеиздат. – 1977. – № 51 (132). - 83 с.
49. **Денисов, Ю.М.** Автоматизированные методы прогнозов стока горных рек Средней Азии [Текст] / Ю.М. Денисов, Н.А. Агальцева, А.В. Пак. – Ташкент: САНИГМИ. – 2000. – 159 с.
50. **Руководство по гидрометеорологическим прогнозам:** руководящий документ [Текст]. – Л.: Гидрометеиздат. – 1989. выпуск 1. – 357с.
51. **Руководство по гидрологической практике. Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов.** [Текст]. – Женева: ВМО. – 2012. – Часть 2. Издание 6. – 324 с.
52. **Rango A.** Seasonal streamflow estimation in the Hymalayan region employing meteorological satellite snow cover observations [Text] / A. Rango, V. Salomonson and J. Foster // Water Resources Research. – 1977. – V. 13, № 1.– P.109-112.
53. **Джорджио, М.В.** Использование спутниковых снимков для изучения динамики снежного покрова и оценка среднего вегетационного расхода р.Амударьи [Текст] / М.В. Джорджио, М.В. Ситникова, Б.К. Церев // Труды ГГИ. – Л.: Гидрометеиздат. – 1980. № 276. С. 110-132.

54. **Yang, D.** Streamflow response to seasonal snow cover extent changes in large Siberian watersheds [Text] / [D. Yang, D. Robinson, Y. Zhao and other] // Journal of Geophysical Research. – 2003. – Vol. 108 (D18), 4578, doi: 10.1029/2002JD003149.
55. **Delbart, N.** Remote sensing of Andean mountain snow cover to forecast water discharge of Cuyo rivers [Text] / [N. Delbart, S. Dunesme, E. Lavie and other] // Applied Research. – 2015. – № 103-2. doi.org/10.4000/rga.2903
56. **McGuire, M.** Use of satellite data for streamflow and reservoir storage forecasts in the Snake River Basin [Text] / [M. McGuire, A. Wood, A. Hamlet and other] // Water Resources Planning and Management. – 2015. – V. 132, No. 2. – P. 97-110.
57. **Tahir, A.** Snow cover dynamics and hydrological regime of the Hunza River basin, Karakoram Range, Northern Pakistan [Text] / [A. Tahir, P. Chevallier, Y. Arnaud and other] // Hydrology and Earth System Sciences, European Geosciences Union. – 2011. – Vol. 15 (7). – P. 2259-2274.
58. **Мартинек, Дж.** Модель Талого Стока: руководство для пользователей [Текст] / Дж. Мартинек, А. Ранго, Р. Робертц. - Берн : Бернский Университет. Географический факультет. – 1998. – 120 с.
59. **Technical & scientific report on august 2002 – august 2003.** Edited by M. Baumgartner [Text] / Technical & scientific report on august 2002 – august 2003. - Tashkent: Swiss Aral Sea Mission. – 2003. – 62 p.
60. **Наставление по службе прогнозов** [Текст] / Наставление по службе прогнозов. – Л.: Гидрометеопиздат. – Раздел 3, часть 1. – 1962. – 196 с.
61. **Andreas J. Dietz.** Identifying changing snow cover characteristics in Central Asia between 1986 and 2014 from remote sensing data [Text] / [Andreas J. Dietz, C. Conrad, C. Kuenzer and other] // Remote Sensing. – 2014. Vol. 6/ - P. 12752-12775. doi: 10.3390/rs61212752.
62. **Siegfried, T.** Will climate change exacerbate water stress in Central Asia? [Text] / [T. Siegfried, T. Bernauer, R. Guiennet and other] // Climate Change. – 2011. – Vol. 112. – P. 881–899.

63. **Gafurov, A.** Cloud removal methodology from MODIS snow cover products. [Text] / A. Gafurov, A. Bárdossy // Hydrology and Earth System Sciences. – 2009. – Vol. 13. – P. 1361-1373.
64. **Gafurov, A.** Evaluation of remotely sensed snow cover product in Central Asia [Text] / [Gafurov A., Kriegel D., Vorogushyn S. and other] // Hydrology Research. – 2013. Vol. 44. – P. 506–522. doi:10.2166/nh. 2012. 094.
65. **Морозов, А.Н.** Роль и место совершенных средств полива в интегрированном управлении водными ресурсами [Электронный ресурс] / А.Н. Морозов. – Режим доступа: http://water-salt.narod.ru/a_morozov.htm.
66. **Краснова, И.** Природоохранное право – Россия и Центральная Азия [Электронный ресурс] / И. Краснова, Д. Зиганшина, Б. Мухаммадиев. – Режим доступа: <http://www.eecca-water.net>.
67. **Вторая оценка трансграничных рек, озер и подземных вод ЕЭКООН:** конвенция по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер [Текст] / Вторая оценка трансграничных рек, озер и подземных вод ЕЭКООН. – Женева: ООН. – 2011. – 430 с.
68. **Ибатуллин, С.** Предрасположенность стран Центральной Азии к внедрению Интегрированного управления водными ресурсами [Текст] / С. Ибатуллин, Д. Нурмаганбетов // Применение концепции интегрированного управления водными ресурсами в Центральной Азии – существующая практика и дальнейшее развитие. – Алматы. – 2013. С. 132-145.
69. **Духовный, Д.А.** Интегрированное управление водными ресурсами – путь к выживанию Центральной Азии [Текст] / Д.А. Духовный // Применение концепции интегрированного управления водными ресурсами в Центральной Азии – существующая практика и дальнейшее развитие. – Алматы. – 2013. С. 125-131.
70. **Долгушин, Л.Д.** Ледники [Текст] / Л.Д. Долгушин, Г.Б. Осипова. - М.: Мысль - 1989. - 448с.
71. Методические указания по учету стока воды на гидроэлектрических станциях РД 13-34.21.564-00. [Текст]. – М.: СПО ОРГРЭС. – 2001. – 58 с.

72. **Ильясов, А. Т.** Формирование стока рек в горной части Средней Азии и роль снеговых, ледниковых и грунтовых вод в этом процессе [Текст] / А. Т. Ильясов // Труды III Всесоюзного гидрологического съезда. – Л.: Гидрометеиздат. – 1960. – Т. 5. – 422 с.
73. **Петрушевский, Б.А.** Сложение четвертичных отложений Тянь-Шаня [Текст] / Б.А. Петрушевский // Бюллетень МОИП. Отдел геологии. М.: МОИП - Т. 23 (1). - 1948. <https://elibr.go.ru/handle/123456789/220709>.
74. **Шульц, С.С.** Геологическое описание маршрута вдоль Тянь-Шаня из Оша в Каракол (материалы к новейшей тектонике). [Текст] / С.С. Шульц // Тр. Таджикско-Памирской эксп. Л.: Тр. ТПЭ. – 1936. – вып.38. – С. 3-131.
75. **Воейков, А.И.** Климаты земного шара, в особенности России [Текст] / А.И. Воейков // Избранные сочинения. – М.: АН СССР. – т.1. – 1948. – 713 с.
76. **Подрезов, О.А.** Изменение современного климата Северного и Северо-Западного Кыргызстана (температура и осадки 1930-2010гг.) [Текст] / А.О. Подрезов. Бишкек: КРСУ. – 2017. – 324 с.
77. **Атлас Киргизской ССР. Природные условия и ресурсы.** [Карта] / Атлас Киргизской ССР. Природные условия и ресурсы. – М.: ГУКГ СССР. – 1987. – Т.1. – 157 с.
78. **Подрезов, О.А.** Горная метеорология и климатология [Текст] / А.О. Подрезов. Бишкек: КРСУ. – 2000. – с 269 с.
79. **Дюргеров, М.Б.,** Оледенение Тянь-Шаня [Текст] / [М.Б. Дюргеров, М.Г. Кунахович, В.Н. Михаленко и др.]. – М.: ВИНТИ. – 1995. – 230 с.
80. **Пономаренко, П.Н.** Атмосферные осадки Киргизии [Текст] / П.Н. Пономаренко. Л.: Гидрометеиздат. – 1976. – 134 с.
81. **Кузьмиченок, В.А.** Цифровые модели характеристик увлажнения Кыргызстана [Текст] / В.А. Кузьмиченок. – Бишкек: КРСУ. – 2008. – 227 с.
82. **Бокоева, Э.Т.** Классификация природных геосистем средней части бассейна реки Нарын [Текст] / Э.Т. Бокоева // Вестник БГУ. – Бишкек – 2007. – №2. – С. 101-104.

83. **Изменение климата 2014 г.: обобщающий доклад** [Текст] / Изменение климата 2014 г. – Женева: МГЭИК. – 2014. – 163 с.
84. **Pepin, N.** Elevation-dependent warming in mountain regions of the world [Text] / [N. Pepin, R.S. Bradley and other] // Nature Climate Change. – 2015. – Vol. 5. – P. 424–430. doi:10.1038/NCIMATE2563.
85. **Aizen, V.B.** Glaciers and hydrological changes in the Tien Shan: simulation and prediction [Text] / V.B. Aizen, E.M. Aizen, V.A. Kuzmichonok // Environmental Research Letters. – 2007. – Vol. 2, № 4. – P. 1-10. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045019.
86. **Aizen, V.B.** Climate and Central Asia glaciers, changes and consequences [Text] / V.B. Aizen, E.M. Aizen // Proc. 1st Asia CliC Symp. JAMSTEC (Yokohama, Japan). – 2006. P. 7–14.
87. **Aizen, V.B.** Assessment of glacial area and volume change in Tien Shan (Central Asia) during the last 150 years using geodetic, aerial photo, ASTER and SRTM data [Text] / [V.B. Aizen, E.M. Aizen A.B. Surazakov and other] // Annals of Glaciology. – 2006. – V. 43 – P. 202–213.
88. **Narama, C.** Recent changes of glacier coverage in the western Terskey-Alatoo range, Kyrgyz Republic, using Corona and Landsat [Text] / [C.Narama, Y.Shimamura, D.Nakayama and other] // Annals of Glaciology. – 2006. – V. 43. – P. 22–39.
89. **Li, B.** Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan [Text] / [B. Li, A-X. Zhu, Y. Zhang and other] // Journal of Glaciology. – 2006. – V.52, № 178. – P. 25–32.
90. **Bolch, T.** Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data [Text] / T. Bolch // Global and Planetary Change. – 2007. Vol. 56, № 1. – P. 1-12.
91. **Kutuzov, S.** Glacier retreat and climatic variability in the eastern Terskey-Alatoo, inner Tien Shan between the middle of the 19th century and beginning of the 21st century [Text] / S. Kutuzov, M. Shahgedanova // Global and Planet. Change. – 2009. – V. 69. – P. 59–70.

92. **Петраков, Д.А.** Толщина льда, объем и современные изменения площади ледника Сары-Тор (массив Ак-Шыйрак, Внутренний Тянь-Шань) [Текст] / [Д.А. Петраков, И.И.Лаврентьев, Н.В. Коваленко и другие] // Журнал Криосфера Земли. – 2014. – т.18, № 3. – С. 91–100.
93. **Hagg, W.** Glacier changes in the Big Naryn basin, Central Tian Shan [Text] / [W. Hagg, C. Mayer, A. Lambrecht et al.] // Global and Planet Change. – 2012. – Vol.110. – Part A. – P. 40-50. doi:10.1016/j.gloplacha.2012.07.010.
94. **Шабунин, А.Г.** Каталог ледников Кыргызстана [Электронный ресурс] / А.Г. Шабунин. – Бишкек. – 2018. – Режим доступа: www.caiag.kg/phocadownload/projects/Catalogue%20%20of%20glaciers%20Kyrgyzstan%202018.pdf
95. **Кузьмиченок, В.А.** Изменения климатических характеристик и высоты фирновой линии Кыргызстана во второй половине XX века [Текст] / В.А. Кузьмиченок // Изучение факторов формирования и оценка влияния водохранилищ Нижне-Нарынского каскада ГЭС на качество водных ресурсов бассейна реки Нарын изотопными методами (по результатам проекта МНТЦ КР-1430, 2007-2010). – Бишкек: МНТЦ. – 2010. С. 6-19.
96. **Кузьмиченок, В.А.** Оледенение и сток в бассейне реки Нарын. Инвентаризация, временные изменения, прогноз [Текст] / В.А. Кузьмиченок // Изучение факторов формирования и оценка влияния водохранилищ Нижне-Нарынского каскада ГЭС на качество водных ресурсов бассейна реки Нарын изотопными методами (по результатам проекта МНТЦ КР-1430, 2007-2010). – Бишкек. – 2010. С.19-39.
97. **Ниязов, Дж. Б.** Влияние климатических изменений на сток реки Гунт (приток реки Пяндж, бассейн реки Амударья, Таджикистан) за период 1940-2016гг. [Текст] / Дж. Б. Ниязов, О.Ю. Калашникова, С.О. Мирзохонова // Известия АН Республики Таджикистан. – № 3, 2019г.
98. **Ниязов, Дж. Б.** Влияние метеопараметров на сток и прогноз половодья на реке Гунт (приток реки Пяндж, бассейн реки Амударья, Таджикистан) [Текст] / [Текст] / [Дж. Б. Ниязов, О.Ю. Калашникова, С.О. Мирзохонова и

- др.] // Материалы Международной научной конференции, посвященной 15-летию со дня образования ЦАИИЗ. Дистанционные и наземные исследования в Центральной Азии. – Бишкек. – 2019. – С. 178-186.
99. **Ниязов, Дж. Б.** Динамика стока и прогноз половодья на реке Варзоб по данным наземных наблюдений [Текст] / Дж. Б. Ниязов, О.Ю. Калашникова // Гидрометеорология и экология. – №1. – Алматы. – 2020. – С. 163-175.
100. **Айзен, В.Б.** Климат, снежный покров, ледники и сток в ТяньШане [Текст] / В.Б. Айзен, Е.М. Айзен, Ж.А. Мелак // Бюллетень водных ресурсов. – 1995. – № 31(6). – С. 1113-1129.
101. **Аламанов, С.К.** Оценка величины и согласованности колебаний стока рек бассейна реки Нарын: сб. науч. тр. [Текст] / С.К. Аламанов // Метеорология и гидрология в Кыргызстане. – Бишкек: КРСУ. – 2006.
102. **Gafurov, A.** MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data [Text] / [A.Gafurov, S.Lüdtke, K.Unger-Shayesteh at other] // Environmental Earth Science. – 2016. – № 14. 75:1078. Doi: 10.1007/s12665-016-5869-x
103. **Dietz, A.** Snow-cover variability in central Asia between 2000 and 2011 derived from improved MODIS daily snow-cover products [Text] / A. Dietz, C. Kuenzer, C. Conrad // International Journal of Remote Sensing Application. – 2013. – № 34 (11): 3879-3902.
104. **Hall, D.** Development and evaluation of a cloud-gap-filled MODIS daily snow-cover product [Text] / [D. Hall, G. Riggs, J. Foster at al.] // Remote Sensing Environment. – 2010. – № 114. P. 496–503.
105. **Hall, D.K.** MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 5 [Text] / D.K. Hall, V.V. Salomonson, G.A. Riggs // Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. – 2006. <http://dx.doi.org/10.5067/63NQASRDPDB0>.
106. **Hall, D.K.** MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 6 [Text] / D.K. Hall // Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data

Center Distributed Active Archive Center. – 2016.

<http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD10A1.006>.

107. **Подрезов, О.А.** Методы статистической обработки и анализа гидрометеорологических данных: учебник для вузов [Текст] / О.А. Подрезов. – Бишкек: КРСУ. – 2019. – 262 с.
108. **Venkatesh, M.** Stream Network and Watershed Delineation using Spatial Analyst Hydrology Tools: manual of user. M. Venkatesh. – Purdue University. – 2012. – 14 с.
109. **Ниязов, Дж. Б.** Оценка водных ресурсов Памиро-Алая методами дистанционного зондирования (на примере рек Кафирниган и Гунт) [Текст] / Дж. Б. Ниязов, О.Ю. Калашникова, А.А. Гафуров // Вестник КРСУ. – Бишкек. – 2020. – Т.20. №4. С 152-157.
110. **Apel, H.,** Baimaganbetov A., Kalashnikova O., Gavrilenko N., Abdykerimova Z., Agalhanova M., Gerlitz L., Unger-Shayesteh K., Vorogushyn S., Gafurov A. Statistical forecast of seasonal discharge in Central Asia for water resources management: development of a generic (pre-) operational modeling tool [Text] / [H. Apel, A. Baimaganbetov, O. Kalashnikova et al.] // Geophysical Research Abstract. – Vienna: EGU2017. – 2017. – Vol.19: 9017.
111. **Apel, H.** Seasonal discharge prediction by multiple linear models: manual of user [Text] / H. Apel. – Potsdam: GFZ. – 2016. – P. 21.
112. **Gerlitz, L.** Climate informed seasonal forecast of water availability in Central Asia: State-of-the-art and decision making context [Text] / L. Gerlitz, S. Vorogushyn, A. Gafurov// Water Security. – 2020. – № 10 (2020) 100061.
113. **Калашникова, О.Ю.** Влияние климатических изменений на динамику стока реки Нарын [Текст] / О.Ю. Калашникова // Результаты современных научных исследований и разработок: сборник статей Международной научно-практической конференции. Пенза: МЦНС Наука и Просвещение. – 2017. – С. 192-198.
114. **Калашникова, О.Ю.** Изменение многолетних климатических характеристик и стока в верховьях реки Нарын в вегетационный период

- [Текст] / О.Ю. Калашникова // Материалы международной конференции «Дистанционные и наземные исследования Земли в Центральной Азии». – Бишкек: КРСУ. – 2014. С. 312-322.
115. **Третье Национальное сообщение Кыргызской Республики по рамочной Конвенции ООН об изменении климата** [Текст] / Третье Национальное сообщение Кыргызской Республики по рамочной Конвенции ООН об изменении климата. – Бишкек. – 2016. – 275 с.
116. **Молдобеков, Б.Д.** Исследование тенденции изменения климата в Кыргызстане [Текст] / [Б.Д. Молдобеков, А.Н. Мандычев, О.Ю. Калашникова и др.] // Вестник МУК. – 2016. – №1 (29). – С. 38–46.
117. **Аламанов С.К.** Долгосрочный прогноз стока за вегетационный период рек с ледниковым питанием: сб. науч. тр. [Текст] / С.К. Аламанов // Гидрология Киргизии. - Фрунзе. – 1989. – С.6.
118. **Диких, А.Н.** Особенности динамики оледенения и ледникового стока Тянь-Шаня в условиях глобального потепления климата (в пределах стран Центральной Азии) [Текст] / А.Н. Диких // Интегрированное и ориентированное на устойчивость управление водными ресурсами. Алматы: Идан. – 2010. – С. 144-150.
119. **Калашникова О.Ю.** Оценка динамики компонентов стока рек ледникового питания в горах Тянь-Шаня в условиях изменения глобального климата (на примере реки Нарын) [Текст] / О.Ю. Калашникова, С.К. Аламанов, Р.А.Усубалиев // Наука и новые технологии и инновации Кыргызстана. – Бишкек. – 2020. – № 3, С. 8-13.
120. **Калашникова, О.Ю.** Изменение объёмов составляющих стока на реке Нарын за многолетний период 1964-2017гг. [Текст] / О.Ю. Калашникова, Р.А.Усубалиев, С.К. Аламанов // Известия ВУЗ-ов Кыргызстана. – Бишкек. – 2020. – № 2.
121. **Савельев, А.А.** Балансовая гидрологическая модель бассейна реки Нарын и малых рек, питающих Токтогульское водохранилище [Текст] / А.А. Савельев, И.В.Токарев // Изучение факторов формирования и оценка влия-

- ния водохранилищ Нижне-Нарынского каскада ГЭС на качество водных ресурсов бассейна реки Нарын изотопными методами (по результатам проекта МНТЦ КР-1430, 2007-2010). – Бишкек. – 2010. С. 39-56
122. **Калашникова, О.Ю.** Использование наземных и спутниковых данных о снежном покрове для прогноза стока реки Нарын [Текст] / О.Ю. Калашникова, А.А. Гафуров // Лед и Снег М.: Наука. Т. 57, №4. – 2017. – С. 507-5017. <http://dx.doi.org/10.15356/2076-6734-2017-4-507-517>
123. **Калашникова, О.Ю.** К разработке методов долгосрочного прогноза стока горных рек и притока воды в водохранилище на примере реки Нарын [Текст] / О.Ю. Калашникова // Наука и новые технологии и инновации Кыргызстана. - Бишкек. – 2015. - №5. С. 100-103.
124. **Коновалов, В.Г.** Вопросы моделирования и прогноза стока рек снежоведникового типа питания в современных условиях [Текст] / [В.Г. Коновалов, В.А.Рудаков, О.Ю. Калашникова и др.] // Журнал Вопросы географии. М.: Кодекс. - 2018.- №145. – С. 123-143.
125. **Калашникова, О.Ю.** Предупреждение экологических рисков, связанных с подтоплениями и наводнениями в бассейнах рек Ат-Баши и Алабуга [Текст] / О.Ю. Калашникова// Наука и новые технологии и инновации Кыргызстана. – 2018. – № 11. – С. 51-55.
126. **Kalashnikova, O.** Water availability forecasting in Naryn basin using MODIS snow cover data [Text] / O.Kalashnikova, A.Gafurov// Vestnik KSUSTA. - Bishkek. – 2016. - №3 (53). – С. 134-140.
127. Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики [Текст] / Бишкек: МЧС КР при Правительстве КР. – 2018. – С. 289-320.
128. **Apel, H.** Statistical forecast of seasonal discharge in Central Asia using observational records: development of a generic linear modelling tool for operational water resource management [Text] / [H. Apel,., Z.Abdykerimova, , M. Agalhanova et al] // Hydrology Earth System Sciences. – 2018. – 22, 2225-2254. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2225-2018>.

129. **Калашникова, О.Ю.** Долгосрочный прогноз притока воды в Токтогульское водохранилище на основе статистического моделирования в R-program. [Текст] / О.Ю. Калашникова // Электронный журнал ВАК. – 2020. – № . – С.
130. **Gafurov, A.** Hydrological forecast based on the snow cover index, derived from basin-wide and elevation specific remote sensing snow cover data in mountainous basins [Text] / [A. Gafurov, O. Kalashnikova, H. Apel] // Geophysical Research Abstracts. Vienna : EGU2019. – EGU – 2019. – Vol. 21. – EGU2019-12817.
131. **Гафуров, А.** Оценка водных ресурсов в Центральной Азии методами дистанционного зондирования [Текст] / А. Гафуров, А. Нурбацина, О. Калашникова // Монография Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. М. - 2018. - Т. 2. DOI: 10.25680/9340.2018.70.35.184
132. **Калашникова, О.Ю.** Прогноз водности реки Нарын на месяцы вегетационного периода на основе снимков MODIS [Текст] / О.Ю. Калашникова, А.А. Гафуров, Э.А.Оморова// Наука и новые технологии и инновации Кыргызстана. - 2020. – № 3. – С. 14-18.
133. **Ниязов, Дж.Б.** Использование снимков MODIS в оценке экологических рисков, связанных с опасными гидрологическими явлениями [Текст]/ Дж.Б. Ниязов, О.Ю. Калашникова// Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – 2018. – № 11. – С. 56-61.
134. **Bobushev, T.** Climate change and adaptive management: the dynamics of natural and socio-economic risks and sustainable development of rural communities in the kyrgyz republic [Text] / T. Bobushev, J. Qi, O. Kalashnikova // Reforma. – 2017. – Vol.3, Issue 75. – P. 6-14.
<http://dergipark.org.tr/en/pub/reforma/issue/40380/483016>