Казахский национальный университет им. аль-Фараби

УДК 556.5 (043.3) На правах рукописи

БОЛАТОВА АЙГЕРИМ АРДАКОВНА

Оценка и моделирование гидрографа стока рек Оба и Ульби в условиях изменения климата

6D061000 – Гидрология

Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (Ph.D)

Научные консультанты:
С.А. Долгих, к.г.н., член реестра национальных экспертов Секретариата Рамочной конвенции ООН об изменении климата (UN-03570-H4RO)
В.П. Крысанова, к.ф-м.н., Потсдамский институт изучения климатических изменений, PIK, Потсдам, Германия

Республика Казахстан
Алматы, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

вдхр.	Водохранилище
р.	Река
оз.	Озеро
гг.	Годы
г.	Город
с.	Село
ст.	Станция
пос.	Поселок
уроч.	Урочище
КНР	Китайская Народная Республика
РК	Республика Казахстан
МС	Метеостанция
ГП	Гидрологический пост
РГП	Республиканское Государственное Предприятие
ГЭС	гидро-электро станция
Q	Сток реки, м^3/с
P	Обеспеченность, %
Cv	Коэффициент вариации
Cs	Коэффициент ассиметрии
P	Осадки, мм
T	Температура воздуха, ^{o}C

SWIM - The Soil and Water Integrated Model- эко-гидрологическая модель почвы и воды

ЦМР – цифровая модель рельефа

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission (Миссия по топографической съемке с помощью радарного шаттла)

NSE – коэффициент Нэша-Сатклифа

PBIES – ошибка по объему

CLIM5 - Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 - проект взаимного сравнения связанных моделей, этап 5)

ISIMIP - The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project - Проект межсекторального сравнения моделей воздействия

RCP4.5 - Representative Concentration Pathway 4.5 (сценарий умеренных выбросов парниковых газов)

RCP8.5 - Representative Concentration Pathway 8.5 (экстремальный сценарий высокого уровня выбросов парниковых газов)

ВВЕДЕНИЕ

Проблема изменения климата является одной из ключевых глобальных вызовов современности и занимает центральное место в научных исследованиях, государственных стратегиях и международных соглашениях. Первые научные сообщения о возможных изменениях климата относятся к началу XX века [1, 2], однако лишь с накоплением достаточно протяжённых временных рядов атмосферных наблюдений в середине — конце XX века возникли системные и обоснованные исследования климатических трендов [3]. В 1980-е годы появились первые убедительные публикации, демонстрировавшие нестационарность климата, а в 1990-е годы — свидетельства устойчивого глобального потепления с темпами роста среднегодовой температуры, не наблюдавшимися ранее. В результате изучение изменения климата и его многоаспектных последствий трансформировалось в самостоятельное и междисциплинарное научное направление, охватывающее физику климата, гидрологию, сельское хозяйство, энергетику, экосистемные исследования и социально-экономические адаптационные стратегии.

Казахстан, как страна с развитыми энергосектором и промышленностью, относится к числу государств с высоким углеродным следом; основной вклад в эмиссию парниковых газов даёт энергетический сектор, на долю которого приходится свыше 80% выбросов. Государство последовательно включилось в международные климатические инициативы: ратификация Рамочной конвенции ООН по изменению климата (1995), присоединение к Киотскому протоколу (2009) и партийному Парижскому соглашению (2016) отражают стремление интегрировать климатическую проблематику в национальную политику. В национальных документах закреплены целевые ориентиры по снижению выбросов и переходу к углеродной нейтральности к середине века, что предполагает кардинальные преобразования энергетического баланса страны — отуглеродирование экономики через переход с угля и нефти на более чистые виды топлива и развитие возобновляемой энергетики. Реализация таких задач требует не только технологического и экономического переоборудования, но и научно-обоснованного планирования адаптационных мер с учётом региональной гидрологической уязвимости.

Климатические изменения в Казахстане уже фиксируются в наблюдательных рядах и аналитических исследованиях. Так, по индексам аномалий и многолетним наблюдениям исследователи показали устойчивую тенденцию к повышению температуры воздуха за период 1941–2011 гг., усреднённый темп которой составляет порядка 0,28 °C за десятилетие, с выраженным усилением потепления зимой и наибольшим приростом минимальных и максимальных температур в начале XXI века [4]. Одновременно отмечены тенденции к изменению годовых сумм осадков, что в совокупности с повышением температуры формирует сложные трансформации водного режима регионов. Моделированные сценарии климатических изменений для Казахстана предсказывают дальнейшее и заметное потепление: по ряду сценариев ожидается повышение средних температур на 1,7–1,9 °С в 2020–2039 гг. и на 2,4–3,1 °С в 2040–2059 гг. относительно опорного периода 1981–2010 гг. [5]. Такие изменения создают предпосылки для существенной трансформации гидрологических процессов — изменения сезонности стока, сокращения снегового накопления в одних районах и возможного увеличения интенсивности осадков в других, что в свою очередь влияет на водоснабжение, сельское хозяйство, гидроэнергетику и экосистемы.

Гидрологические и климатические контрасты по территории Казахстана значительны: от относительно влажных восточных и юго-восточных регионов с развитой сетью приточных рек до засушливых западных территорий с ограниченными водными ресурсами. Трансграничные реки и водохранилища формируют основу регионального водного баланса и служат критически важными ресурсами для экономической деятельности и экосистем. В этом контексте особую значимость приобретают средние и малые реки восточных областей — в частности, Оба и Ульба — которые выполняют системообразующие функции: подпитывают водохранилища (включая Шульбинское), обеспечивают хозяйственные потребности (орошение, техническое и питьевое водоснабжение), поддерживают работу предприятий и гидроэнергетику, а также служат опорными элементами местных экосистем и биологических сред.

Вместе с тем для рек Оба и Ульба на текущем этапе наблюдается дефицит детализированных исследований и адаптированных моделей, необходимых для адекватной оценки гидрологических последствий климатических изменений. Научные пробелы касаются как качественного и количественного описания изменений сезонности стока, так и оценки потенциального увеличения частоты и интенсивности экстремальных гидрологических явлений — паводков и засух. Для принятия обоснованных управленческих решений и разработки адаптационных мер необходимы интегрированные исследования, которые объединяют наблюдательные гидрометеорологические ряды, климатические сценарии и современные эко-гидрологические модели.

Настоящее исследование направлено на заполнение названных пробелов путем проведения комплексного анализа динамики стока рек Оба и Ульба в условиях прогнозируемого изменения климата. Планируется систематическая обработка и анализ многолетних гидрометеорологических данных, построение суммарных интегральных кривых и других статистических характеристик, а также применение численного моделирования для сценарной оценки будущего поведения водного режима. Особое внимание уделяется интеграции данных о климате, гидрологии и водопользовании, что обеспечивает комплексный подход к оценке водных ресурсов в ближайшие десятилетия.

Методологически исследование опирается на использование ансамбля климатических сценариев, сформированных глобальными моделями системы Земли (GCM), и на применение эко-гидрологической модели SWIM (Soil and Water Integrated Model) [8], которая позволяет учитывать процессы перераспределения осадков по высоте, снегозапасы, поверхностный и подповерхностный сток в условиях изменяющихся климатических параметров. В рамках работы запланированы калибровка и валидация модели по наблюдательным гидрологическим рядам, оценка её воспроизводимости по стандартным статистическим критериям, а также проведение сценарных расчетов для интерпретации влияния умеренного (RCP4.5) и ударного (RCP8.5) путей радиационного форсинга на годовой и сезонный сток в рассматриваемых бассейнах.

Ожидается, что результаты исследования обеспечат научно-методическую базу для оптимизации использования водных ресурсов в бассейнах Обы и Ульбы, позволят скорректировать режимы работы водохранилищ, выработать рекомендации по снижению рисков паводков и засух, а также будут полезны при разработке региональных стратегий адаптации к климатическим изменениям. Практическое применение результатов может включать поддержку деятельности гидрометеорологических служб, органов водного хозяйства и местных администраций при планировании и принятии решений в условиях растущей климатической неопределённости. Таким образом, данное исследование является значимым вкладом в решение прикладных задач обеспечения водной безопасности и устойчивого развития восточных регионов Казахстана.

.

Цель работы:

Оценить возможные изменения стока рек Оба и Ульби и притока воды в Шульбинское водохранилище при прогнозируемом изменении климата в 21 веке.

Задачи исследования:

- Сбор и статистическая обработка гидрологических данных по створам бассейнов рек Оба и Ульби.
- Калибровка и адаптация гидрологической модели SWIM (The Soil and Water Integrated Model) для расчёта стока на реках Оба и Ульби.
- Оценка изменений годового и талого стока рек Оба и Ульби в 21 веке с использованием модели SWIM по данным расчётов ансамбля климатических моделей.
- Оценка возможного изменения притока воды в Шульбинское водохранилище в 21 веке.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Впервые оценены изменения стока рек Оба и Ульби в 21 веке с учетом климатических изменений.
- Впервые адаптирована и применена эко-гидрологическая модель SWIM (The Soil and Water Integrated Model) для моделирования гидрографа рек Оба и Ульби в условиях изменения климата.
- Впервые оценены возможные изменения притока воды в Шульбинское водохранилище на основе сценариев изменения климата.

Практическая значимость работы заключается в оценке долгосрочных сценариев изменения стока рек Оба и Ульби, что имеет важное значение для водохозяйственного планирования в условиях изменения климата. Полученные результаты могут быть использованы для разработки стратегий устойчивого управления водными ресурсами рассматриваемых бассейнов, включая оптимизацию водозабора и регулирование стока.

Исследование создаст научную базу для обоснования адаптационных мер, включая оптимизацию режимов работы водохранилищ и улучшение управления паводковыми рисками. Полученные результаты могут быть полезны при разработке нормативных и стратегических документов в сфере водного управления. Несмотря на то, что работа фокусируется на конкретных речных бассейнах, её подходы и выводы могут быть адаптированы и для других регионов Казахстана с аналогичными гидрологическими условиями.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Анализ рядов гидрометеорологических показателей в бассейнах рек Оба (с. Шемонаиха) и Ульби (с. Ульби Перевалочная) показал рост средней многолетней величины средней годовой температуры воздуха с 1990-х годов, незначительное уменьшение осадков начиная с 1995-х годов, а также некоторое снижение водности исследуемых рек с 1995 года в условиях изменения климата.

- Проведенные исследования показали применимость эко-гидрологической модели SWIM для моделирования гидрографа стока рек Оба и Ульби за период наблюдений 1961–2020 гг., что подтверждает возможность использования модели SWIM для сценарных расчетов стока этих рек при прогнозируемых изменениях климата.

- Моделирование речного стока бассейнов рек Оба и Ульби в условиях глобального потепления на основе сценариев изменения климата (RCP 4.5 и RCP 8.5) указывает на некоторое увеличение стока в бассейне реки Оба и на смещение пика расхода воды с мая на апрель (на один месяц раньше) в обоих исследуемых бассейнах.

Личный вклад автора заключается**:**

1) в сборе и анализе исходной информации;
2) в сборе, обработке и анализе сценариев изменения климата;
3) в адаптации и калибровке гидрологической модели SWIM;
4) в выполнении гидрологических расчетов

Апробации результатов исследования

Результаты исследования обсуждались на международных конференциях:

- 15-й форум по региональному мониторингу, оценке и прогнозированию для Азии, Китай, Наннин, 8-10 мая 2019 г.;

- 5-й Международный семинар по метеорологической науке и технологиям в Центральной Азии, 14-16 октября 2019 г.

По материалам диссертационного исследования опубликованы 1 статья в индексируемом отечественном журнале, 1 статья в индексируемом международном журнале, 2 статьи в журналах рекомендованных ККСОН.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 118 страницах и состоит из определений, обозначений и сокращений, введения, 5 глав, заключения и списка использованных источников из 81 наименования; содержит 20 таблиц, 29 рисунков, 5 формулы и 6 приложений.

Первая глава посвящена всестороннему анализу отечественных и зарубежных публикаций, посвящённых проблеме изменения климата и его влиянию на водные ресурсы. В ней рассматриваются основные тенденции глобального потепления, выявленные в трудах международных исследовательских центров и национальных гидрометеорологических служб. Особое внимание уделено научным работам, связанным с изменением температурного режима, распределением осадков и их влиянием на гидрологические процессы в аридных и горных регионах Центральной Азии. В главе обобщаются результаты исследований, демонстрирующих повышение температуры воздуха, изменение режима осадков и стока рек на территории Казахстана, а также анализируются сценарные прогнозы, выполненные по данным моделей системы Земли (CMIP). Рассматриваются существующие подходы к моделированию гидрологических процессов и применению численных моделей.

Вторая глава содержит описание природно-географических и гидрологических особенностей исследуемого региона — бассейнов рек Оба и Ульба в Восточном Казахстане.
В главе рассмотрено географическое положение бассейнов, их административное расположение, границы, особенности рельефа и климатическое районирование.
Описаны климатические условия региона — температурный режим, годовые суммы осадков, сезонные особенности и влияние высотной поясности. Особенностям водного режима, включая сезонные колебания стока, периоды половодья и межени, а также характеристику весеннего снеготаяния как основного источника питания.

Третья глава направлена на выявление закономерностей формирования речного стока и анализ многолетней изменчивости гидрометеорологических характеристик. Представлен анализ метеорологических показателей (температуры, осадков, влажности), их пространственно-временная динамика и выявленные тенденции за последние десятилетия.
Проводится анализ годового стока по многолетним рядам наблюдений, определяются периоды многоводных и маловодных лет, а также тренды

изменения гидрографов.
Рассматривается повторяемость экстремальных гидрологических явлений, включая периоды паводков и маловодья.
Также проводится оценка вклада рек Оба и Ульба в суммарный приток в Шульбинское водохранилище, что имеет практическое значение для управления водными ресурсами и планирования режима работы гидроузла.
Раздел 3.5 рассматривает анализ снегонакопления в бассейнах, что важно для понимания сезонности формирования весеннего стока.

Четвёртая глава посвящена применению экогидрологической модели SWIM (Soil and Water Integrated Model) для бассейнов рек Оба и Ульба. Приведено описание модели SWIM, её теоретические основы, структура и принципы расчёта гидрологических процессов.
Представлены входные данные, включая метеорологические параметры, данные о землепользовании, почвах и топографии, использованные в моделировании.
В подразделе 4.3 осуществляется сравнение наблюдательных данных с реанализом WATCH, что позволяет оценить качество климатических входных данных.
Раздел 4.4 содержит результаты калибровки и валидации модели SWIM для обеих рек. Приведены показатели точности моделирования (Nash–Sutcliffe, R^2, PBIAS) и обсуждены причины расхождений.
Также выполнено моделирование высоких индексов расхода воды (Q10 и Q5), отражающих экстремальные гидрологические условия, что позволяет оценить адекватность модели в воспроизведении паводковых ситуаций.

Пятая глава представляет собой завершающий и аналитический этап исследования, направленный на прогнозирование последствий изменения климата для водных ресурсов региона.
В разделе 5.1 рассмотрены климатические модели системы Земли (GCM), использованные для расчётов, а также методика получения климатических проекций для сценариев RCP4.5 и RCP8.5.
Проводится моделирование исторической динамики стока на основе климатических данных GCM для верификации модели.
Содержится анализ прогнозируемых изменений климата (температуры, осадков, сезонности) в бассейнах рек Оба и Ульба на горизонтах середины и конца XXI века. Раздел 5.2 посвящён оценке изменений речного стока при различных сценариях глобального потепления. Представлены графики сезонных гидрографов, сравнительный анализ с базовым периодом, а также оценка возможного смещения весеннего пика стока.
Также выполнена оценка изменения притока в Шульбинское водохранилище, что имеет прикладное значение для управления водными ресурсами и адаптации к климатическим изменениям.

ГЛАВА 1. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ КАЗАХСТАНА: ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ

Казахстан занимает одно из последних мест по уровню водообеспеченности среди стран Содружества Независимых Государств (СНГ), и около половины водных ресурсов Казахстана формируется на территории соседних государств [9]. Поэтому оценка воздействия изменения климата на водные ресурсы очень важна в этом регионе.

В настоящее время существует не так много исследований о влиянии изменения климата на водные ресурсы в Центральной Азии в целом и в Казахстане в частности. В связи с этим регион можно отнести к разряду недостаточно изученных. Тем не менее, можно найти некоторые исследования в научной литературе.

С. Бисенбаева и др. [10] провели исследования изменений стока в бассейнах рек Арысь и Келес под влиянием изменения климата, а также деятельности человека в период 1960-2015 гг. Период 1976–1991 гг. характеризуется уменьшением стока в обоих бассейнах в основном за счет деятельности человека. Последующий период 1992–2015 гг. показывает увеличение стока в основном за счет увеличения осадков. С помощью теста Петита и метода двойной кумулятивной кривой в исследуемых районах в 1975 и 1991 годах были выявлены точки резкого изменения годового стока. Данное исследование показывает, что деятельность человека является основным фактором изменения стока в данном регионе в течение исследуемого периода.

В статье Рахимовой и др. [11] на основе метода климатической эластичности и модели общей циркуляции (МОЦ) сделан вывод о том, что изменение климатических условий повлияет на гидрологический цикл в бассейне реки Буктырма. Авторы рассчитали сток в трех различных высотных зонах за последние 65 лет (1950-2015 гг.), чтобы выявить изменения и уточнить влияние климатических факторов на сток в бассейне Буктырмы. Исследование было разделено на два периода: период 1950-1982 гг. и период антропогенного воздействия 1983-2015 гг. Влияние изменения климата на сток в период 1950-2015 гг. было следующим: 70 % увеличение в верхнем течении, 62,11 % увеличение в среднем течении и 15,34 % увеличение в нижнем течении. Воздействие антропогенной деятельности на сток было выше в нижнем течении (84,66 %), чем в верхнем и среднем течении.

Голубцов [12] проводил оценку уязвимости водных ресурсов Казахстана к антропогенным изменениям климата, рассматривая структуры адаптационных мер. В его работе показано, что изменения климата и воздействие человека значительно изменяют гидрологический режим рек, что требует срочных действий в области адаптации и управления водными ресурсами, чтобы предотвратить дефицит воды в регионе. Работа Голубцова помогает подчеркнуть важность оценки уязвимости водных ресурсов Казахстана в условиях антропогенного изменения климата, что актуально для более широкого понимания климатической угрозы для региона.

Турсунова и др. [13] дали оценку сокращения речного стока в Казахстане под влиянием деятельности человека в период 1974 г. – 2015 гг. на 16,0 км^3/год. Фактические суммарные ресурсы поверхностных вод Казахстана в текущем периоде составляют 102 км^3/год, 54,5 км^3/год из которых составляет локальный сток, а 50,8 км^3/год приходится на соседние страны, в том числе отток 3,70 км^3/год за пределами Казахстана (возвратные ресурсы). Согласно ожидаемому снижению трансграничного стока к 2030 году, возможно дальнейшее сокращение водных ресурсов страны в среднем до 87,1 км^3/год и до менее чем 50,0 км^3/год в засушливые годы. Это свидетельствует о потенциальной угрозе острого дефицита воды в Казахстане к 2050 году.

В рамках Евразийского банка развития проводились исследования о влиянии изменения климата на водные ресурсы в Центральной Азии [14]. Согласно этой работе, интенсивное потепление климата наблюдается во всей Центральной Азии, а оценка перспективности водных ресурсов региона в условиях изменения климата показывает, что ни один из рассмотренных сценариев не предполагает увеличения имеющихся водных ресурсов. Полученные расчеты показывают, что к 2050 году объем речного стока в бассейне реки Амударья уменьшится на 10-15%, а в реке Сырдарья в среднем на 6-10%.

Работа Какабаева и др. [15] также подчеркивает влияние изменения климата на водные ресурсы в Казахстане, включая бассейн реки Есиль. Прогнозы для региона показывают тенденцию к уменьшению водных ресурсов, что предполагает необходимость внедрения инновационных технологий для эффективного управления водными потоками и их распределением.

Было опубликовано несколько исследований, включающих моделирование речных бассейнов в Казахстане с использованием современных моделей формирования стока и моделей общей циркуляции (МОЦ). Авторы статьи Шахгеданова и др. [16] исследовали влияние прогнозируемых изменений климата и ледников на речной сток пяти водосборов северного Тянь-Шаня (Казахстан), включающих ледники с помощью концептуальной гидрологической модели HBV-ETH. Полученные результаты свидетельствуют о том, что пик стока в этом регионе придется на первую четверть XXI века. По прогнозам, в конце 21 века ледники потеряют 34-39% своей площади. Суммарный речной сток в июле-августе в конце XXI века снизится на 20-37% в водосборных бассейнах с низкой (2-4%) степенью оледенения. В водосборных бассейнах с высокой степенью оледенения (16 % и более) не ожидается значительных изменений летнего стока, в то время как весенний сток, по прогнозам, увеличится.

В статье Лобановой и др. [17] анализируется, как воздействие изменения климата на гидрологический режим и температурный режим может повлиять на орошаемое сельскохозяйственное производство в бассейнах рек Аспара (расположенной частично в Казахстане и частично в Кыргызстане) и Исфара (в Таджикистане и Кыргызстане). Результаты моделирования с использованием модели SWIM и сценариев изменения климата (RCP4.5 и RCP8.5) показывают, что изменение климата создаст неблагоприятные условия для орошаемых яровых культур из-за сокращения стока рек в течение вегетационного периода. С другой стороны, прогнозируемое смещение пикового стока на более ранний срок благоприятно скажется на орошаемых озимых культурах, поскольку обеспечит больше воды для весеннего орошения.

Ю. Дидовец и др. [18] изучили, как изменение климата повлияет на сток воды в восьми бассейнах рек Центральной Азии, включая водосборные бассейны Жабай и Буктырма, расположенные в северной и восточной частях Казахстана соответственно. Согласно данному исследованию, в бассейне реки Жабай в период 2070 – 2100 гг. по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 наблюдается тенденция к увеличению стока на 32%. К другим ожидаемым изменениям относятся: сокращение периода накопления снега, более раннее (на один месяц) наступление пикового стока воды весной и уменьшение речного стока летом. Прогнозируемые изменения речного стока для бассейна р.Буктырма также положительные, но довольно незначительные (< 5%). В свою очередь Саиров и др. [19] в своем исследовании изменений речного стока реки Буктырма подтверждают, что изменение климата, наряду с повышением температуры и изменением осадков, будет способствовать изменению сезонного распределения водных ресурсов, что окажет негативное воздействие на водоснабжение в засушливые годы.

В работе [20] наглядно показано, что изменения в водном режиме рек южных и юго-восточных регионов Казахстана, такие как сокращение стока в засушливые годы, требуют применения адаптационных мер для управления водными ресурсами. Учитывая изменения температурных режимов и осадков, прогнозируется, что в будущем будет происходить изменение водного режима рек, особенно в весенний и летний период, что повлияет на водоснабжение и сельское хозяйство в Казахстане. Исследование подчеркивает необходимость комплексного подхода к управлению водными ресурсами, особенно в условиях изменения климата и увеличения потребностей в водных ресурсах, для обеспечения устойчивого развития Казахстана в будущем.

В статье Талиповой и др. [21] рассматривается современное изменение ресурсов стока бассейна реки Иле, сопрягающего территории двух стран - Китая и Казахстана, с учетом климатических и антропогенных воздействий. Было выявлено, что интенсивное потепление происходит неравномерно Для оценки влияния хозяйственной деятельности на сток авторы использовали метод водного баланса русла и статистические данные коэффициента водозабора безвозвратного водопотребления. Оценка антропогенного воздействия в бассейне реки Иле показывает снижение общего стока реки на 6,0 км^3, т.е. на 28% от климатического стока (21,4 км^3).

Жупанхан и др. [22] также отмечают, что Казахстан, как важный игрок в системе водного хозяйства Центральной Азии, должен разработать стратегию для решения проблем с дефицитом воды и улучшения управления водными ресурсами на основе данных о текущем и прогнозируемом состоянии водных систем.

Также есть работы по оценке водности в условиях изменения климата на трансграничных с Казахстаном бассейнах и также в бассейнах стран Центральной Азии. В работе Калиевой [23] исследовано влияние региональных изменений климата на сток и режим ледниковых и снеговых рек в бассейне трансграничной реки Шу между Казахстаном и Кыргызстаном. Согласно проведенному анализу, среднегодовой сток рассматриваемых рек к 2050 году снизится в среднем на 25-30 %. В другой работе [24] проведено моделирование стока бассейна реки Шу под влиянием изменения климата с применением модели SWAT. Согласно прогнозам, климат в будущем станет теплее и суше по всем сценариям, и будущий климат будет характеризоваться большими сезонными и годовыми колебаниями. Прогнозируемый максимальный сток в каждом из двух будущих сценариев (RCP 4.5 и RCP 8.5) ожидается на один месяц раньше, чем в базовом периоде (1966-1995 гг. были выбраны в качестве базового периода, а 2016-2045 гг. и 2066-2095 гг. в качестве ближайшего и отдаленного будущего, соответственно.), из-за снижения стока в летние месяцы.

Также в работе [25] было изучено воздействие изменения климата в бассейне реки Нарын в Кыргызстане на основе моделей общей циркуляции (МОЦ) и с использованием гидрологической модели SWAT. Обнаружено смещение стока в сторону более раннего пика на один месяц, значительное сокращение увлажненности почвы и увеличение эвапотранспирации.

В работе Радченко [26] было изучено влияние изменения климата на Ферганскую долину. Были использованы динамически пониженный сценарий A1B SRES для оценки последствий изменения климата на период 2071-2100 гг. по отношению к базовому периоду 1971-2000 гг. и применена концептуальная гидрологическая модель Hydrologiska Byråns Vattenavdelning (HBV-light) для оценки вклада стока малых притоков. Моделирование показало снижение летнего стока на 12-42% и увеличение зимне-весеннего стока на 44-107%, а также смещение гидрологического режима по причине таяния снега в более ранние периоды года.

Важно отметить, что для других рек Казахстана, таких как Шу и Сырдарья, уже проводились исследования, показывающие снижение стока, вызванное изменениями температурных режимов и осадков. Например, для бассейна реки Шу [24] к 2050 году ожидается уменьшение объема стока, особенно в летний период. Это связано с повышением температуры и изменением распределения осадков, что повлияет на накопление снега и скорость его таяния. Ожидается, что зимний сток значительно уменьшится из-за более высоких температур и изменений в режимах осадков. Меньше снега будет накапливаться зимой, что в будущем приведет к снижению водных ресурсов в зимние месяцы. Из-за более раннего таяния снега в горах весной, пик стока воды наступит раньше. Это может вызвать угрозу паводков в весенний период, особенно в случае интенсивных осадков, что потребует улучшенного управления водными ресурсами для предотвращения потерь и ущерба.

ГЛАВА 2 КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ ИССЛЕДУЕМОГО РЕГИОНА

2.1 Географическое положение

Объект исследования охватывает бассейны рек Оба и Ульби, расположенные в пределах Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан. Этот регион находится в юго-восточной части страны и представляет собой горно-равнинную территорию Алтайской системы, где сосредоточены важные природные и водные ресурсы.

Горы Восточного Казахстана являются частью обширного Алтайского орографического комплекса, который протягивается вдоль государственных границ Казахстана с Россией, Китаем и Монголией. Алтай играет стратегическую роль в формировании стока реки Иртыш и отличается высокой природной ценностью, сочетая разнообразие ландшафтов — от высокогорных хребтов до предгорных равнин.

Высочайшей точкой региона является гора Белуха (4620 м), расположенная на границе Казахстана и России. От неё в северо-западном направлении тянется система хребтов Западного Алтая с абсолютными высотами 2200–2800 м. Сюда входят хребты Листвяга, Холзун, Коксуйские горы и Тигирецкий хребет (рис. 1.1). На западе к ним примыкает ряд горных массивов — Ульбинский, Ивановский и Убинский хребты, характеризующиеся чередованием крутых и пологих склонов, покрытых густой лесной растительностью.

Южная часть региона представлена системой Южного (Онтүстік) Алтая (рис.1.1), состоящего из двух параллельных горных цепей высотой до 3400 м. Здесь зарождаются многочисленные притоки Иртыша, среди которых — Каракобы, Аккобы, Куршим, Калжыр, Нарын и другие водотоки, играющие значительную роль в водоснабжении Восточного Казахстана.

Рисунок 1.1 - Схема горных хребтов Казахстанского Алтая [78]

В верхнем течении, до впадения в озеро Жайсан, река Иртыш принимает несколько значительных правобережных притоков, среди которых реки Алкабек и Калжыр, последняя вытекает из озера Маркаколь и отличается высоким водоносным режимом. Ниже по течению, в 1960 году, на Иртыше была возведена плотина Бухтарминской гидроэлектростанции, в результате чего образовалось крупное Бухтарминское водохранилище — одно из крупнейших в Казахстане. При его заполнении уровень воды поднялся настолько, что озеро Жайсан оказалось полностью включённым в акваторию водохранилища.

В Бухтарминское водохранилище впадает ряд значимых притоков: Куршим, Нарын, Бухтырма, Улькен Бокен, Таинты и другие. Ещё выше по течению, в районе города Усть-Каменогорск, в 1953 году была построена Усть-Каменогорская ГЭС, сформировавшая Усть-Каменогорское водохранилище. Ниже этого гидроузла в Иртыш впадает правобережный приток — река Ульби, играющая важную роль в водном балансе региона.

Далее вниз по течению, в районе посёлка Шульба, в 1988 году было завершено строительство Шульбинской ГЭС, образовавшей третье по каскаду — Шульбинское водохранилище. В него впадает один из наиболее полноводных правобережных притоков Иртыша — река Оба.

Таким образом, двигаясь от верховьев к низовьям, Иртыш принимает ряд крупных правобережных рек: Калжыр, Куршим, Бухтырму, Ак Берель, Тургысын, Ульби, Оба и Шульбинку. Среди них наиболее водообильными и значимыми по гидрологическому вкладу являются Бухтырма, Оба и Ульби (рис. 1.2).

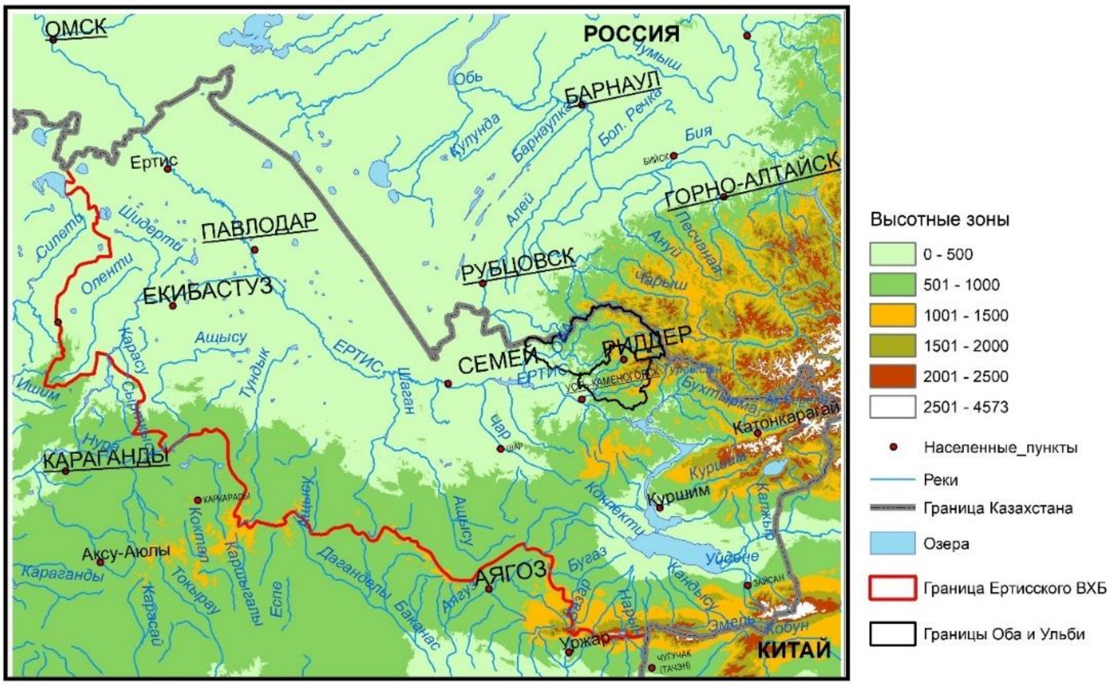


Рисунок 1.2 - Притоки р. Ертис, расположенные на территории Казахстана

Главной водной артерией региона является **река Иртыш**, принимающая крупные правобережные притоки, включая **Бухтырму**, **Ульбу** и **Оба**. На реке последовательно расположены три гидротехнических сооружения: **Усть-Каменогорская**, **Бухтырминская** и **Шульбинская** ГЭС, формирующие Иртышский каскад водохранилищ. Основные правобережные притоки, питающие каскад, — это реки **Куршим**, **Бухтырма**, **Ульби** и **Оба**, отличающиеся сложной гидрологической структурой и выраженной сезонной изменчивостью стока.

Река **Оба** берет начало в пределах Восточного Алтая на высоте 2000–2500 м. Её бассейн охватывает западную часть области и включает как горные, так и равнинные территории (49°–51° с.ш. и 85°–87° в.д.). **Река Ульби** также является правым притоком Иртыша, начинается в предгорьях Алтая и протекает через территорию Усть-Каменогорска, далее впадая в Иртыш (49°–51° с.ш., 82°–85° в.д.) [27].

2.2 Гидрографическая характеристика

Реки Оба и Ульба, вместе с их многочисленными притоками, составляют основу гидрографической сети региона. Река Оба, протяжённостью 140 км, формирует сток преимущественно в горной зоне, тогда как река Ульби, длиной около 100 км, используется для различных хозяйственных нужд, включая водоснабжение и орошение. Питание рек смешанное: снеговое, дождевое и подземное. Наибольший объём стока приходится на весенний период, когда происходит интенсивное таяние снега. Летние паводки связаны с кратковременными ливнями.

Изменение климатических условий уже оказывает влияние на гидрографию региона, изменяя сезонный режим стока и увеличивая вероятность как паводков, так и засух. Это подчеркивает важность применения современных методов прогнозирования водности и адаптации инфраструктуры к новым климатическим условиям.

Река Ульби (рис. 1.3) образуется слиянием рек Тихая (L= 25 км, F= 681 км^2) и Громотуха (L= 34 км, F= 451 км^2), которые берут начало в Ивановском и Убинском хребтах (Рудный Алтай). Река Тихая берет начало юго-восточнее г. Теснинский Белок и образуется слиянием рек Журавлиха и Филипповка. Протекает по северной окраине города Риддер. Воды реки используются на вновь введенной в эксплуатацию с 2016 года Ульбинской ГЭС Лениногорского каскада. Река Громотуха берёт свое начало с Южного склона Ивановского хребта и Северо-Западного склона Ульбинского хребта от многочисленных рек и ручьев, основные из которых Правая и Левая Громотуха. В верхнее течение реки Левая Громотуха перебрасывается часть стока реки Киши Ульби, в верховьях которой было создано Малоульбинское водохранилище. Введено в строй в 1936 году, отметка уровня водохранилища – 1612 м. Объём – 87,7 млн.м^3. В нижнем течении на реке размещены Хариузовская и Тишинская ГЭС Лениногорского каскада.

Рисунок 1.3- Река Ульби у г. Усть-Каменогорска [79]

В районе города Усть-Каменогорск впадает в реку Ертис являясь её правым притоком. Длина реки 100 км, площадь водосбора 4990 км^2. В пределах водосбора имеется 40 озер, общей площадью 14,9 км^2. Среднемноголетний расход составляет 96,8 м^3/с.

Река Оба (рис.1.4) - одна из самых полноводных правобережных притоков р. Ертис, образуется от слияния рек Ак Оба (L= 58 км, F= 806 км^2) и Кара Оба (L= 70 км, F= 691 км^2), берущих начало с Коргонских белков в зоне вечных снегов. Верховья ее с северо-востока и с запада сжаты Тигирецким, Коксуйским и Убинским хребтами. Наиболее крупные притоки — р. Бол. Чесноковка (L= 14 км, F= 141 км^2), Становая Оба (L= 24 км, F= 717 км^2), Белопорожная Оба (L= 51 км, F= 590 км^2), Мал. Убинка (L= 45 км, F = 1610 км^2). Длина реки 278 км, площадь водосбора 9850 км^2. В пределах водосбора имеется 295 озер, общей площадью 34,8 км^2. Среднемноголетний расход составляет 173 м^3/с.

Рисунок 1.4 - Река Оба у г. Шемонаиха [80]

На реке Ертис, как указывалось выше, имеется 3 крупных искусственных водоема, образованных плотинами Буктырминской ГЭС, Усть-Каменогорской ГЭС и Шульбинской ГЭС. В результате сток реки ниже пос. Шульба сильно зарегулирован.

Выше г. Семей в 4 км ниже с. Старая Шульба создана плотина Шульбинской ГЭС (рис. 1.5). Шульбинское водохранилище является одним из крупных водохранилищ Иртышского каскада, емкость которых составляет 52,7 км^3 комплексного назначения. Общий объём составляет 2390 млн м^3, площадь 255 га. Водохранилище введено в эксплуатацию в 1988 году. Главными притоками являются реки Оба и Ульби. Гидроузел осуществляет неполное сезонное регулирование стока боковой проточности ниже плотины Бухтарминской ГЭС при природоохранных весенних попусках и при прохождении летне-осенних паводков. Режим водохранилища – полностью искусственный, исключая период попусков рек Оба и Ульби в период паводков. В апреле – мае водохранилище срабатывается более чем на половину, чем обеспечивает орошение поймы Ертиса [25].

Рисунок 1.5 - Шульбинская ГЭС на р. Ертис [81]

Весь Иртышский каскад осуществляет следующие попуски: весенний природоохранный, пропуск высоких весенних половодий, летне-дождевых паводков, зимний. В маловодные критические периоды вводятся ограничения попусков. Бухтарминское водохранилище не должно срабатываться ниже отметки уровня мертвого объема 387,84 м БС [28].

2.3 Климатические условия

Климат региона определяется резкоконтинентальным. Теплые и влажные воздушные массы с Атлантического океана доходят на исследуемую территорию трансформированными, потерявшими большую часть влаги, а воздушные массы Северного Ледовитого океана, - холодными и сухими по причине большой удаленности и отгороженности территории горными системами. Холмисто-мелкосопочные и равнинные районы левобережья Иртыша характеризуются особенно большой сухостью. Центральным высокогорным, а также северным и западным районам Алтая характерна наибольшая увлажненность.

Зимой температура воздуха может опускаться до минус 48 °С. Среднемесячная температура июля в предгорьях равна 20,2 °С. Количество атмосферных осадков изменяется с высотой местности. На высоте 200 м оно составляет 410 мм, на высоте 1600 м – 1220 мм. Преобладающая часть осадков, до 70 % от годовой суммы, выпадает в теплое время года. Около 60 % жидких осадков наряду с талыми водами участвует в формировании весеннего половодья, продолжающегося 3…4 месяца [29, 30, 31].

2.4 Особенности водного режима

Реки Оба и Ульби относятся к типичным горным водотокам Восточного Казахстана и обладают схожими особенностями формирования стока. Их гидрологический режим определяется совокупным воздействием климатических факторов, рельефа, снежно-ледникового питания и сезонного перераспределения осадков.

Река Оба

Питание реки Оба носит смешанный характер, в котором преобладает снеговое и дождевое, при значительном вкладе ледниковых вод в верховьях бассейна. Весной наблюдается наиболее интенсивный период водообеспеченности, связанный с таянием снега в горных районах. В этот сезон формируется основной объём годового стока, а максимальные расходы воды приходятся на апрель–май.

В годы с обильными зимними осадками и устойчивым снежным покровом весенние паводки достигают значительных масштабов. В летние месяцы водность реки поддерживается за счёт таяния ледников и дождевых осадков. При прохождении интенсивных ливней возможны кратковременные подъемы уровня воды, сопровождающиеся резкими изменениями гидрографа. Осенью количество осадков уменьшается, снеготаяние прекращается, и уровень воды постепенно снижается.

В зимний период в бассейне реки устанавливается устойчивый ледостав, водообмен резко ослабевает, и сток достигает минимальных значений. Таким образом, для реки Оба характерен паводковый тип водного режима с чётко выраженной весенней фазой половодья и низкой водностью в холодный сезон.

Река Ульби

Гидрологический режим реки Ульби также формируется под влиянием снегового и дождевого питания, при меньшем участии подземных вод. В верхней части бассейна заметную роль играет ледниковое питание, поддерживающее сток в летний период. Весной, в результате интенсивного таяния снега, наблюдаются мощные паводки, которые иногда приводят к подтоплению низменных участков в районе города Усть-Каменогорск.

Летом водность реки остаётся относительно стабильной благодаря осадкам и талым водам, однако в июле–августе возможны кратковременные всплески уровня воды, обусловленные ливневыми дождями. Осенью водность снижается, а к зиме формируется устойчивый период межени, сопровождающийся ледоставом.

Среднегодовые расходы воды по реке Ульби варьируются в зависимости от погодных условий и объёма снежных запасов в зимне-весенний сезон. Межгодовая изменчивость стока выражена довольно сильно, что отражает чувствительность бассейна к колебаниям температуры и осадков.

Общие закономерности водного режима

Для обеих рек характерно сезонное перераспределение стока, при котором на долю весеннего периода приходится наибольшая часть годового водного объёма. Основным источником питания служат снег и ледники, а в летнее время их вклад обеспечивается дополнительными дождевыми осадками.

Континентальный климат региона обуславливает высокую амплитуду колебаний стока в течение года: от значительных паводков весной до минимальных расходов в зимние месяцы. В верховьях бассейнов, где распространены снежники и ледники, формируется устойчивый летний приток, что особенно важно для поддержания водности в межень.

На фоне изменения климата в последние десятилетия наблюдаются трансформации гидрологического режима:

- сокращение площади ледников приводит к уменьшению летнего стока;
- повышение температур вызывает раннее таяние снега и смещение сроков половодья;
- увеличение интенсивности ливней способствует усилению селевой активности и частоте паводков;
- тёплые зимы сокращают продолжительность ледостава и повышают зимний сток.

Эти изменения требуют адаптации методов управления водными ресурсами и внедрения современных моделей прогнозирования стока, позволяющих учитывать климатические тенденции при оценке гидрологического режима рек Оба и Ульби [32].

2.5 Гидрологическая изученность

Реки Оба и Ульби представляют особый интерес для гидрологических исследований благодаря их горному происхождению, сложному режиму стока и значимой роли в водном балансе Восточного Казахстана. Эти водотоки обеспечивают поступление значительных объёмов воды в систему Иртышского каскада и являются важными элементами региональных водных ресурсов.

Уровень их гидрологической изученности можно охарактеризовать как ограниченный и фрагментарный. Основное внимание уделяется вопросам формирования стока, сезонных колебаний водности, снеголедникового питания и влияния климатических изменений. Несмотря на наличие отдельных исследований и многолетних наблюдений, общая полнота и пространственная детализация данных остаются недостаточными.

Река Оба

Наблюдения за уровнем воды, расходом стока и температурным режимом в бассейне реки Оба проводятся РГП «Казгидромет». Основной пункт наблюдений расположен в районе села Шемонаиха, однако сеть гидрологических постов в пределах бассейна малочисленна, что ограничивает возможность пространственного анализа гидрологических процессов.

Получаемые данные применяются преимущественно для прогнозирования паводков и оперативной оценки водности, однако они охватывают главным образом нижние участки русла. В верховьях, где расположены ледниковые источники питания, наблюдения проводятся нерегулярно. Исследования последних лет подтверждают тенденцию сокращения ледников Восточного Алтая, что отражается на снижении летнего стока и изменении гидрографа реки.

Изучение влияния климатических изменений на сток реки Оба пока находится на начальной стадии. Зафиксированы тенденции потепления и изменения режима осадков, однако количественная оценка вклада климатических факторов в изменение водного баланса требует дополнительных многолетних наблюдений. Недостаток информации о подземных водах, селевых процессах и структуре ледникового питания остаётся одной из ключевых проблем.

Река Ульби

Мониторинг гидрологических характеристик реки Ульби также осуществляется Казгидрометом, в основном на гидропосту Ульби-Перевалочная. Регулярные наблюдения ведутся за уровнем воды, расходами и ледовыми явлениями. Несмотря на наличие длительных рядов данных, плотность наблюдательной сети остаётся невысокой.

Весенние паводки на реке Ульби изучены наиболее подробно, поскольку они оказывают прямое влияние на населённые территории, включая город Усть-Каменогорск. Эти исследования позволили выявить связь между интенсивностью снеготаяния и вероятностью наводнений. Однако вклад ледникового питания в суммарный сток изучен недостаточно, что затрудняет точную оценку водного баланса бассейна.

Наблюдается дефицит исследований, посвящённых подземному питанию, гидравлическому моделированию и прогнозированию экстремальных гидрологических событий. Развитие моделей, способных учитывать интенсивные ливневые паводки и селевые потоки, остаётся актуальной задачей для практической гидрологии региона.

Общая характеристика гидрологической изученности

Фундаментальные основы мониторинга в бассейнах рек Оба и Ульби были заложены ещё в советский период, когда данные водотоки рассматривались как часть обширных исследований бассейна Иртыша. В последующие годы наблюдения продолжались, однако развитие инструментальных методов было ограничено.

Современные региональные исследования Казгидромета и отдельных научных институтов Казахстана внесли значительный вклад в понимание гидрологических особенностей рек, однако по-прежнему не хватает пространственно детализированных данных [32]. В частности, редко применяются методы гидравлического и ГИС-моделирования, позволяющие получать более точные оценки характеристик стока.

Также ограничено количество работ, посвящённых долгосрочному воздействию изменения климата на гидрологические процессы и динамику ледников. Отсутствие автоматизированных систем наблюдения и дистанционного мониторинга снижает оперативность получения данных и затрудняет анализ кратковременных экстремальных событий.

Следует отметить, что гидрологические посты расположены неравномерно — в основном у выхода рек из горных районов, что не позволяет оценить процессы формирования стока в высокогорных зонах и на устьевых участках.

Направления совершенствования гидрологического мониторинга

Для повышения качества гидрологических исследований и обеспечения устойчивого управления водными ресурсами целесообразно:

- расширить наблюдательную сеть, особенно в верховьях рек Оба и Ульби;
- внедрять современные технологии мониторинга, включая спутниковые наблюдения, использование беспилотных летательных аппаратов и цифровых моделей рельефа;
- развивать гидрологическое моделирование с учётом сценариев изменения климата (например, RCP4.5 и RCP8.5);
- проводить комплексные исследования подземного и ледникового питания;
- укреплять трансграничное сотрудничество с сопредельными странами (Россией и Китаем) для обмена гидрологической информацией и согласованного управления водными ресурсами.

Реализация этих мер позволит повысить уровень гидрологической изученности рек Оба и Ульби, обеспечить более точное прогнозирование стока и повысить эффективность адаптации водохозяйственного сектора к изменяющимся климатическим условиям.

Основные характеристики исследуемого региона приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики рек Оба и Ульби (в скобках указана дата переноса поста).

№	Название водотока	Название поста	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км^2	Куда впадает	Период действия	
						Открыт	Закрыт
17	р. Ульби	с..Ульби Перевалочная	25	4900	р. Ертис	22.10.1930 (01.11.1940)	Действует
23	р. Оба	с. Шемонаиха	62	8470	р. Ертис	16/04/1954	Действует

ГЛАВА 3 УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА В БАССЕЙНАХ РЕК ОБА И УЛЬБИ

3.1 Анализ рядов метеорологических показателей

Проведен анализ рядов метеорологических показателей, определяющих поверхностный сток по данным МС Шемонаиха (310 м), Лениногорск (809 м) (Риддер), Усть-Каменогорск(285 м), расположенных на различных высотах, рассматриваемой территории.

Для анализа изменений основных климатических параметров, определяющих формирование стока (температуры воздуха и осадков), в данном исследовании использовалась методология, включающая метод разностно-интегральной кривой, а также анализ изменений трендов и скорости их параметров в период наблюдений на метеостанциях бассейна рек Оба и Ульби [33,34].

Метод разностно-интегральной кривой (т.е. график накопленных отклонений от заданной величины, например, арифметического среднего, в зависимости от времени или даты) использовался для выявления возможных трендов или циклов в временных рядах годовой температуры, осадков и стока [35]. Более подробную информацию о методе остаточной массовой кривой можно найти в гидрологической литературе [36, 37]. Для построения остаточной массовой кривой коэффициент K был определён следующей формулой:

$$K_i = Q_i/Q_{сред} \qquad (1)$$

Q_i - это значение переменной в конкретный год за определенный период (например, среднегодовой расход), а $Q_{сред}$ - среднее значение ряда, содержащего n лет.

$$Q_{сред} = (\sum_{i=1}^{n} Q_i)/n \qquad (2)$$

Если $Q_i = Q_{сред}$, то $K = 1$. Разностно-интегральная кривая представляет собой общую сумму отклонений коэффициентов K от среднего многолетнего значения ряда в конце каждого года Q_i (K_i - 1).

$$\sum_{i=1}^{t}(k_i - 1) = f(t) \qquad (3)$$

Суммирование по годовому временному интервалу (t) дает либо восходящий, либо нисходящий наклон кривой, что означает положительную или отрицательную фазу относительно горизонтальной линии соответственно.

Для улучшения интерпретации и повышения сопоставимости графиков между разными реками и переменными, формула (3) нормировалась путем деления на коэффициент вариации (Cv) соответствующего временного ряда:

$$f(t) = \frac{1}{Cv}\sum_{i=1}^{t}(k_i - 1)\ , \quad (4)$$

где коэффициент вариации определяется как отношение стандартного отклонения σ к среднему значению μ:

$$Cv=\frac{\sigma}{\mu}, \qquad (5)$$

Такой подход позволяет устранить влияние амплитуды колебаний и делает возможным корректное сравнение кривых между различными участками или переменными. Нормализация через коэффициент вариации особенно полезна при анализе одновременных процессов в бассейнах с различной гидрологической и климатической характеристикой.

На (рис. 2.1) приведены разностно-интегральные кривые, построенные на основание средних годовых температур воздуха на МС Усть-Каменогорск, Риддер и Шемонаиха (таблица А1 Приложения А).

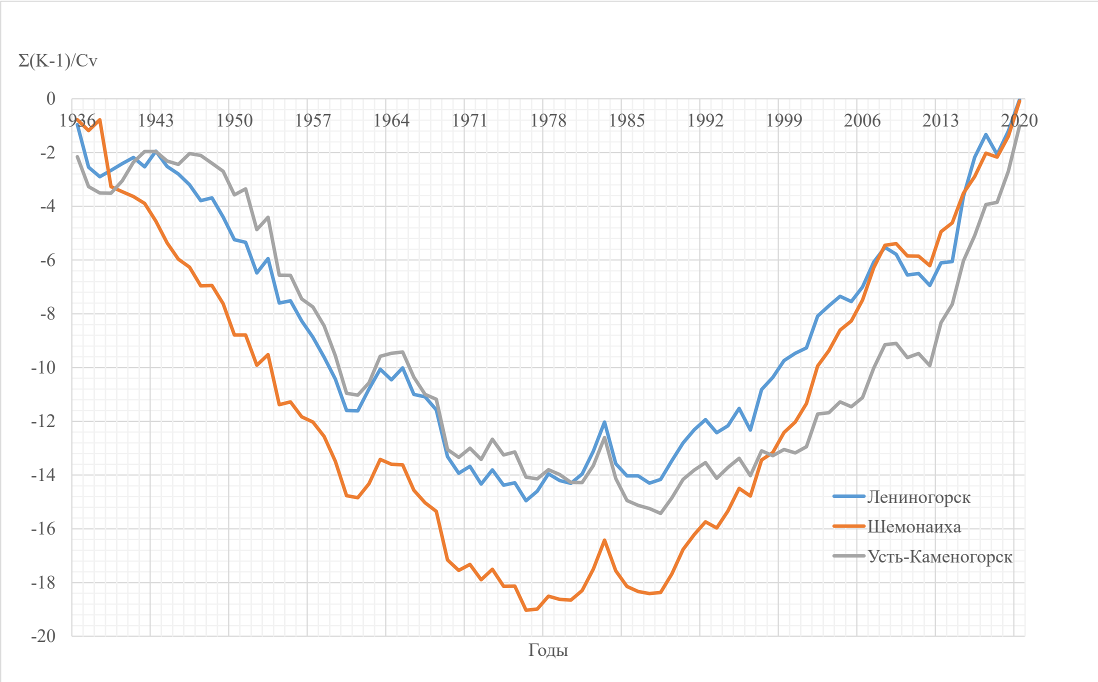


Рисунок 2.1 – Разностно-интегральные кривые средних годовых температур

Исходя из хода данных кривых просматривается интенсивный рост средних годовых температур воздуха с начала 1990-х годов.

Таблица 2.1 - Средние годовые температуры воздуха за многолетние периоды (tср, °C)

Метеостанция	**Высота, м абс**	**Период осреднения, годы**	**tср°C**	**Повышение Δt, °C**
Усть-Каменогорск	285	1936-1989	2.6	1.2
		1990-2020	3.8	
Лениногорск	809	1936-1989	2.0	1.0
		1990-2020	3.0	
Шемонаиха	329	1936-1989	1.9	1.7
		1990-2020	3.6	

В целом, средняя многолетняя величина средней годовой температуры воздуха с 1990-х годов, согласно рассматриваемым МС, повысилась на 1.0 - 1,7°С. В таблице 2.1 приведены показатели роста температуры по данным трех МС.

Рост средних годовых температур воздуха может приводить к увеличению суммарного испарения и дефицита увлажненности территорий, а также большему объему стока с высокогорных областей. Для территорий с развитой растительностью, для которых наибольший вклад в суммарное испарение вносит транспирация, она может снижаться с ростом температуры, вызванным ростом концентрации CO_2. Что касается сумм годовых осадков на МС Усть-Каменогорск и Лениногорск (таблица А2 Приложения А), то здесь наблюдается снижение их значений в среднем с конца 1970-х , 1980-х годов (рис. 2.2). . Однако, значения годовых сумм осадков, с 2010 года стали расти. Что касается МС Шемонаиха, то наблюдается устойчивый рост среднегодовых осадков начиная с 1965 года, с 1995 годов – незначительное уменьшение и снова рост, начиная с 2010 годов.

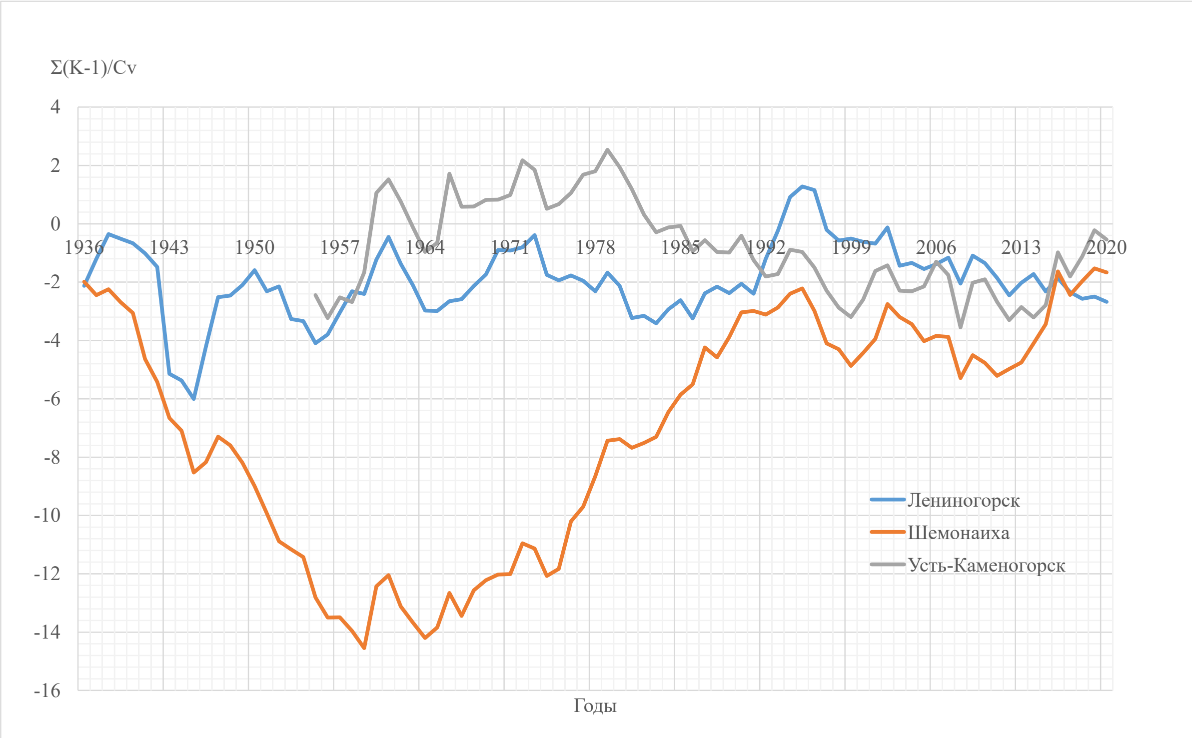


Рисунок 2.2 – Разностно-интегральные кривые годовых сумм осадков

Значение средних многолетних сумм годовых осадков за относительно устойчивые периоды, т.е до 1995 года и после приведены в (табл. 2.2), как видно, количество осадков, хотя и незначительно, но с 1995 года уменьшается, что как показал дальнейший анализ, отразилось и на стоковых характеристиках рек. Однако, как видно из рис.2.2, значения годовых сумм осадков, с 2010 года стали расти. С точки зрения статистического анализа на основание пока еще незначительного периода, десяток лет кардинально выводы о намеченной тенденции делать преждевременно.

Таблица 2.2 - Средние годовые суммы осадков за многолетние периоды (Хср, мм)

Метеостанция	Высота, м абс	Период осреднения, годы	Хср,мм	Изменения	
				ΔX,мм	%
Усть-Каменогорск	285	1936-1994	499	- 19	4 уменьшение
		1995-2020	480		
Лениногорск	809	1936-1994	640	- 33	5 уменьшение
		1995-2020	606		
Шемонаиха	329	1936-1994	446	5	1 увеличение
		1995-2020	451		

Таким образом, исходя из данных разностно-интегральных кривых прослеживается повышение среднегодовых температур воздуха с начала 1995-х годов. Средняя многолетняя величина средней годовой температуры воздуха с 1995-х годов повысилась на 1.0 ^{0}С на МС Лениногорск, 1.2 ^{0}С на МС Усть-Каменогорск и 1.7 ^{0}С на МС Шемонаиха. Рост среднегодовых температур воздуха влечет увеличение испарения и дефицит увлажненности, а также увеличение объема стока с высокогорных областей. Значения сумм годовых осадков незначительно снижается начиная с конца 1995-х годов на 5% на МС Лениногорск, 4% на МС Усть-Каменогорск, что как показал дальнейший анализ отразилось и на стоковых характеристиках рек.

3.2 Годовой сток изучаемых бассейнов

Годовой сток является основной характеристикой речного стока при водохозяйственном проектировании, оценке водных ресурсов бассейнов рек и различных регионов. Годовой сток, как результирующий элемент водного баланса позволяет судить о соотношениях тепла и влаги, степени увлажненности территорий. Годовой сток является базовой характеристикой при разработке методов гидрологических расчетов, исследованиях колебаний стока во времени и пространстве, разработки гидрологических классификаций и районирования.

Согласно проведенным раннее исследованиям [32], при расчете притока воды в Шульбинское водохранилище можно ограничиться двумя гидропостами – р. Ульби – с.Ульби Перевалочная и р.Оба – с. Шемонаиха (рисунок и таблица 2.3). Эти гидропосты замыкают 53% всей площади водосбора, имеющей сток в Шульбинское водохранилище.

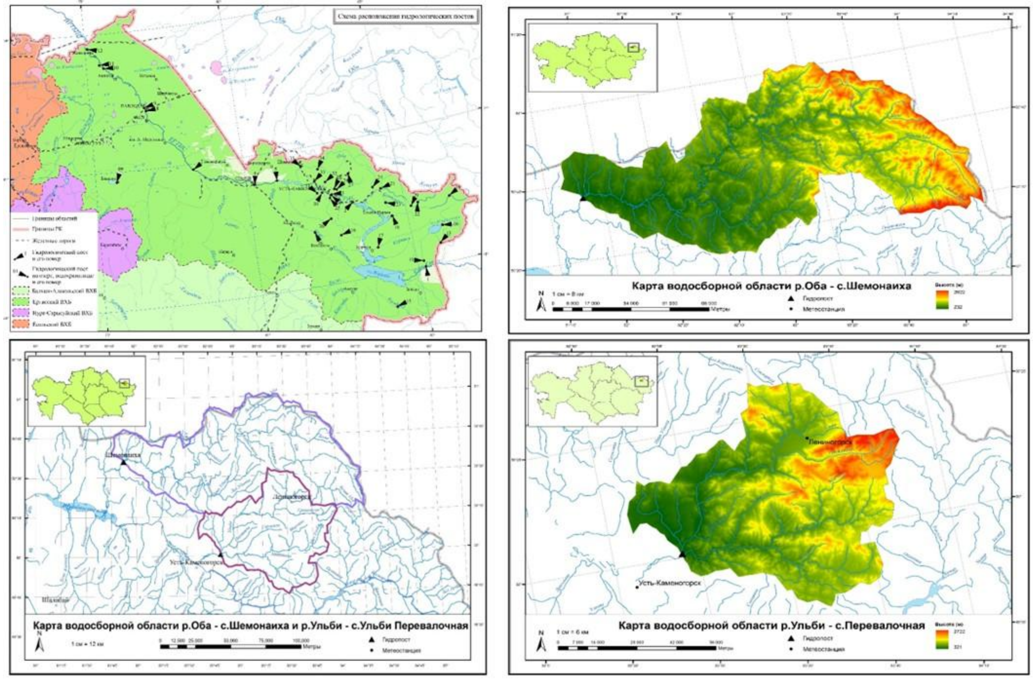


Рисунок 2.3 - Бассейны рек Оба и Ульби

Таблица 2.3 – Основные характеристики бассейнов рек Оба и Ульби

Реки	Оба	Ульби
Площадь бассейна, км^2	8888	4858
Длина реки, км	278	100
Высота, макс. и мин., м	2752 1228	2746 1206
Гидрологические посты, замыкающие створ реки	Шемонаиха	Ульби Перевалочная

Рассматривая колебания средних годовых расходов воды расчетных рек (таблицы Б1-2 Приложения Б), складывающихся из цикличности водности и изменений однородности периодов с относительно устойчивой средней величиной, наблюдаемых с помощью суммарных интегральных кривых стока и выводов климатических изменений метеорологических характеристик можно отметить следующее. За многолетний период, на фоне колебания многоводных и маловодных фаз водности на всех реках отмечается изменение наклона кривой с начала 1995-х годов в сторону снижения годовых величин стока (рис.2.4).

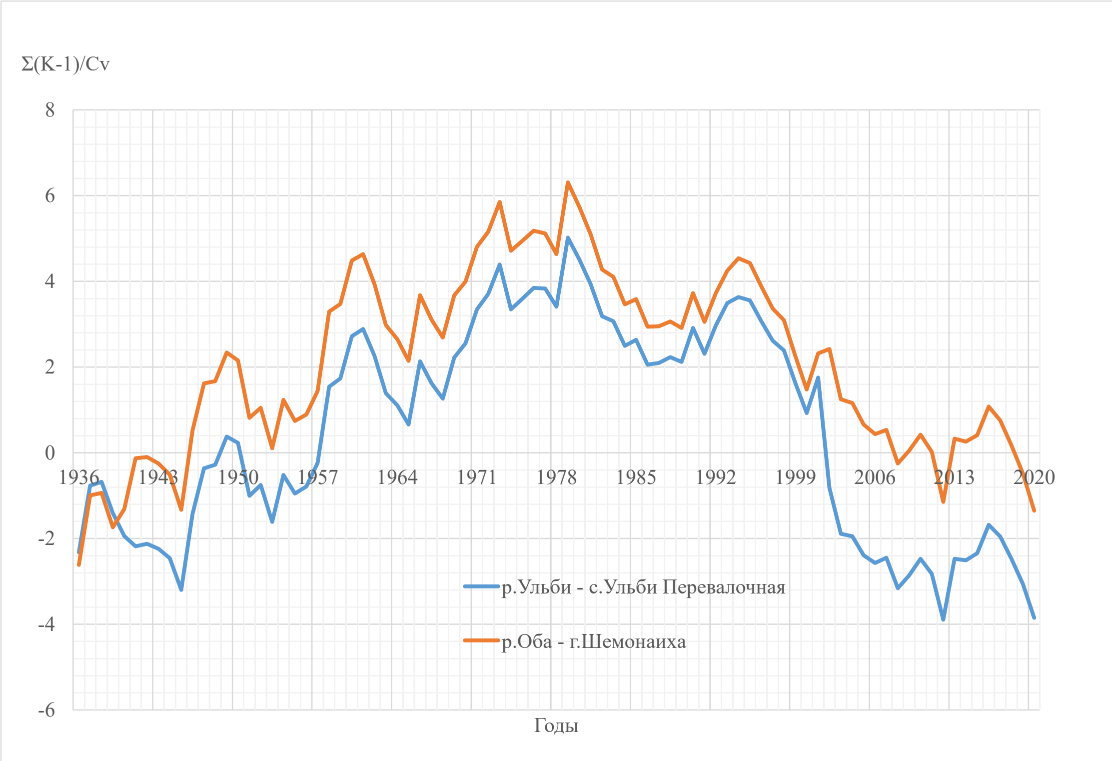


Рисунок 2.4 – Разностно - интегральные кривые годового стока р.Обы - г. Шемонаиха и р. Ульби - с. Ульби Перевалочная

При этом ход кривых совпадает с многолетним режимом годовых осадков рассматриваемых территорий. В связи с этим к расчету стоковых характеристик приняты два периода – с 1936 по 1994 гг. и с 1995 по 2020 гг., что позволило оценить изменение их за счет смены климатических условий.

3.3 Повторяемость многоводных и маловодных лет на реках Оба и Ульби

Для определения периодов повышенной и пониженной водности использовались данные наблюдений с 1936 по 2020 годы над расходами воды исследуемых бассейнов. Была проведена проверка на однородность исходных гидрологических рядов. Для этого были использованы два параметрических критерия – Фишера и Стьюдента. Оба этих критерия относятся к категории стандартных критериев, и рекомендуются в большинстве нормативных документов в качестве официального теста на однородность. Критерий Фишера используется для проверки однородности гидрологических рядов по дисперсии, а критерий Стьюдента по среднему значению. Ряд исследования был поделен на 2 группы: 1) 1936- 1994, 2) 1995 - 2020 гг. Так как разностно - интегральные кривые годового стока указывают на уменьшение стока на Обе и Ульби начиная с 1995 года (рис.2.4). Результаты расчетов, приведенные в таблице 2.4, по тесту Стьюдента показали неоднородность рядов годового стока для всего периода исследования (1936-2020 гг.). И наоборот, ряд оказался однородным для периодов 1936-1994 гг. и 1995-2020 гг. для обеих рек. По тесту Фишера период 1936-1994 гг. оказался однородным. Остальные два периода – неоднородны.

Таблица 2.4 – Оценка однородности годового стока по критериям Стьюдента и Фишера по р.Оба – с. Шемонаиха и р. Ульби – с. Ульби Перевалочная

№	Период наблюдений	**р.Оба – с. Шемонаиха**				**р. Ульби – с. Ульби Перевалочная**			
		Среднее значение	Стандартное откл., σ	Критерии		Среднее значение	Стандартное откл., σ	Критерии	
				Стьюдента	**Фишера**			**Стьюдента**	**Фишера**
1	**1936-2020**	171	44.6	$\frac{2.55}{1.96}$ неоднороден	$\frac{1.54}{1.68}$ однороден	95	25.2	$\frac{2.14}{1.96}$ неоднороден	$\frac{1.49}{1.68}$ однороден
2	**1936–1994**	180	47.5	$\frac{0.55}{1.96}$ однороден	$\frac{1.47}{1.87}$ однороден	99	26.6	$\frac{0.05}{1.96}$ однороден	$\frac{1.44}{1.87}$ однороден
3	**1995–2020**	157	38.1	$\frac{1.67}{1.96}$ однороден	$\frac{0.47}{0.38}$ неоднороден	86	21.6	$\frac{1.85}{1.96}$ однороден	$\frac{0.49}{0.37}$ неоднороден
* В столбцах 5,6,9 и 10 в числителе приводится расчетное значение критерия, а в знаменателе – его критическое значение									

Известно, что применение параметрических тестов для связанных рядов приводит к увеличению вероятности ошибок первого рода. В рамках исследования были проведены статистические тесты для проверки значимости различий между двумя рядами 1936-1994 гг. и 1995-2020 гг. на исследуемых реках и для анализа использовались критерий Краскала-Уоллиса, ранговый критерий Вилкоксона и инверсионная статистика Манна-Уитни (таблицы 2.5-2.6).

Таблица 2.5 - Проверка значимости различий между двумя годовыми рядами (1936-1994 гг. и 1995-2020 гг.) стока на р.Оба – г.Шемонаиха с использованием непараметрических критериев

Критерий	Показатель	Значение	Критическое значение (α = 0,05)	Критическое значение (α = 0,1)	Вывод
Краскала-Уоллиса	H-статистика	3,65	3,84	2,71	Различия не значимы при α = 0,05
	Вероятность p(H)	0,06	0,05	0,1	различия значимы
Вилкоксона	W_эмп	705	784	984	различия значимы
	W_ср	884	-	-	
Манна-Уитни	U_эмп	387	433	633	различия значимы
	U_ср	533	-	-	

Согласно таблице 2.5 для р.Оба – г.Шемонаиха рассчитанное значение статистики критерия Краскала-Уоллиса [41] составило H = 3,65, при этом уровень значимости p(H) = 0,06. Верхнее критическое значение при уровне значимости α = 0,05 составляет 3,84, а при α = 0,1 – 2,71. Так как полученное p-значение выше 0,05, различия между группами не являются статистически значимыми на уровне 5%, однако находятся на границе значимости при α = 0,1.

Эмпирическое значение статистики Вилкоксона составило W_эмп = 705, что ниже среднего значения W_ср = 884. Для сравнения: критическое значение α = 784, критическое значение β = 984. Так как W_эмп значительно ниже W_ср, это может свидетельствовать о наличии различий между группами.

Эмпирическое значение U-статистики Манна-Уитни составило U_эмп = 387, что ниже среднего значения U_ср = 533. Для сравнения: критическое значение α = 433, критическое значение β = 633.

Так как U_эмп значительно ниже U_ср, можно предположить наличие различий между сравниваемыми группами.

Для реки Ульби – с.Ульби Перевалочная также посчитаны статистические тесты для проверки значимости различий между двумя рядами 1936-1994 гг. и 1995-2020 гг., результаты представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - - Проверка значимости различий между двумя годовыми рядами (1936-1994 гг. и 1995-2020 гг.) стока на р. Ульби – с.Ульби Перевалочная с использованием непараметрических критериев

<table>
<tr><th>Критерий</th><th>Показатель</th><th>Значение</th><th>Критическое значение (α = 0,05)</th><th>Критическое значение (α = 0,1)</th><th>Вывод</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Краскала-Уоллиса</td><td>H-статистика</td><td>3,6</td><td>3,84</td><td>2,71</td><td>Различия не значимы при α = 0,05</td></tr>
<tr><td>p(H)</td><td>0,06</td><td>0,05</td><td>0,1</td><td>различия значимы</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Вилкоксона</td><td>W_эмп</td><td>663</td><td>741</td><td>934</td><td rowspan="2">различия значимы</td></tr>
<tr><td>W_ср</td><td>838</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Манна-Уитни</td><td>U_эмп</td><td>368</td><td>416</td><td>609</td><td rowspan="2">различия значимы</td></tr>
<tr><td>U_ср</td><td>513</td><td>-</td><td>-</td></tr>
</table>

Таким образом для обоих исследуемых рек по результатам критериев Манна-Уитни и Вилкоксона можно предположить наличие значимых различий между сравниваемыми выборками (1936-1994 гг. и 1995-2020 гг.). Однако критерий Краскала-Уоллиса не выявил статистически значимых различий на уровне α = 0,05, но значение p = 0,06 указывает на возможную тенденцию к значимости на уровне α = 0,1.

На основе анализа результатов применения параметрических (Стьюдента и Фишера) и непараметрических (Краскала–Уоллиса, Вилкоксона, Манна–Уитни) критериев можно сделать следующий вывод:

Параметрические и непараметрические методы в целом дополняют друг друга, но дают частично различающиеся оценки однородности и значимости различий между подвыборками.

Параметрические критерии (Стьюдента и Фишера) показали:

- Неоднородность исходного ряда за весь период (1936–2020 гг.) по критерию Стьюдента для обеих рек.
- Однородность подвыборок 1936–1994 и 1995–2020 гг. по средним значениям (Стьюдент).
- В то же время, по критерию Фишера в подвыборках выявлены различия в дисперсиях в более поздний период (1995–2020 гг.), что указывает на изменение характера вариабельности стока.

Непараметрические критерии, менее чувствительные к предпосылкам о распределении данных:

- Критерии Вилкоксона и Манна–Уитни подтвердили наличие статистически значимых различий между двумя периодами по обоим водотокам.
- Критерий Краскала–Уоллиса не подтвердил различия на уровне значимости 0,05, но показал значение $p = 0{,}06$, что может указывать на наличие пограничной значимости при $\alpha = 0{,}1$.

Таким образом, непараметрические методы подтверждают тенденцию, выявленную параметрическими тестами, но дают более устойчивые доказательства наличия различий между подвыборками, особенно в отношении медианных значений. Это указывает на изменение распределения годового стока во времени и подтверждает целесообразность рассмотрения периодов 1936–1994 и 1995–2020 гг. как отдельных по своим гидрологическим характеристикам.

Практический вывод: использование как параметрических, так и непараметрических методов позволяет более полно охарактеризовать изменения водности и надежнее выявить изменения в структуре гидрологических рядов.

Расчеты параметров кривых распределения и величин годового стока рек различной обеспеченности в условиях наблюдающихся изменений климатических показателей позволяют оценить современное состояние водности исследуемых бассейнов и определить тенденций развития водно-балансовых элементов рассматриваемых территорий. Обеспеченные величины годового стока основных рек исследуемой территории определены по кривым обеспеченности стока, построенным по вычисленным значениям нормы и коэффициентов вариации годового стока. Третий параметр стока коэффициент асимметрии определён по степени соответствия данных наблюденной теоретической кривой обеспеченности (рисунки В1-4 приложения В). Основные характеристики средних годовых расходов воды для рек Оба и Ульби приведены в таблице 2.7 и рассчитаны также с помощью программы StokStat с использованием биномиальных кривых распределения при $Cs=2Cv$.

Таблица 2.7 – Характеристики средних годовых расходов воды рек в различные климатические периоды для р. Оба – с. Шемонаиха и р. Ульби – с. Ульби Перевалочная

№	Река-пункт	Расчетный период	Qср , м3/с	Cv	Расходы воды различной обеспеченности , %					
					1	5	10	50	75	95
1	р. Оба - г. Шемонаиха	1936-1994	177	0.26	305	262	240	180	145	110
		1995-2020	157	0,24	260	225	207	155	130	100
		уменьшение, %	11		14,8	14,1	13,8	13,9	10,3	9,1
2	р. Ульби - с. Ульби Перевалочная	1936-1994	99	0,27	172	147	135	97	80	62
		1995-2020	88	0,25	148	127	117	86	72	56
		уменьшение, %	11		14,0	13,6	13,3	11,3	10,0	9,7

Таким образом, наблюдается сокращение расхода воды на обоих исследуемых водосборах начиная с 1995 года в пределах 10 %. Межгодовая изменчивость годового стока на обоих бассейнах слабая ($C_v < 30\%$).

Для анализа повторяемости многоводных и маловодных лет была рассчитана вероятность превышения величин годового стока для исследуемых бассейнов и их суммарного стока. В таблице 2.8 приведены принятые градации водности, а в приложении Б (табл.Б3) – величины годового стока и их вероятности, снятые с кривых обеспеченности.

Таблица 2.8 – Градации водности

Водность	Вероятность превышения, %
высокая	менее 20
умеренно - высокая	20 - 40
средняя	40 - 60
умеренно - низкая	60 - 80
низкая	Более 80

Автором было подсчитано количество лет различной водности для исследуемых рек согласно градации водности, полученные результаты представлены в табл. 2.9.

Таблица 2.9 – Количество лет различной водности для рек Оба и Ульби за период 1955–2020гг.

Водность	р. Оба – с. Шемонаиха	р. Ульби – с. Ульби Перевалочная	Суммарный сток
высокая	12	14	12
умеренно - высокая	18	15	17
средняя	8	8	7
умеренно - низкая	17	13	18
низкая	11	16	12

Согласно табл. 2.9, за исследуемый период времени наблюдалось большее количество лет с умеренно–высокой водностью для обоих исследуемых бассейнов.

Анализ изменения количества многоводных и маловодных лет суммарного стока по 10-летиям (рис. 2.5) выявил тенденции уменьшения количества лет высокой водности и увеличения количества лет низкой и средней водности, что и объясняет увеличение коэффициента асимметрии.

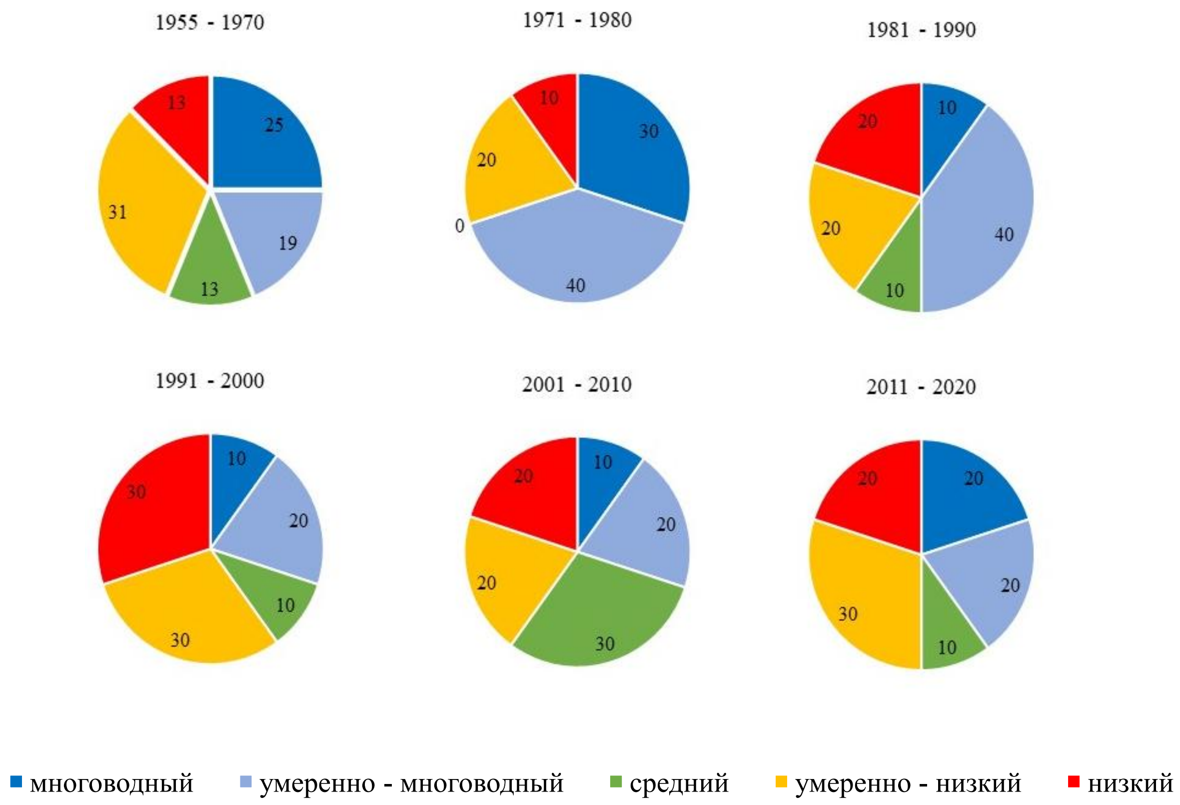


Рисунок 2.5 - Распределение лет различной водности суммарного стока рек Оба и Ульби (%)

Далее на рис.2.6 представлены тренды количества лет различной водности суммарного стока бассейнов Обы и Ульби по десятилетиям в процентном соотношении.

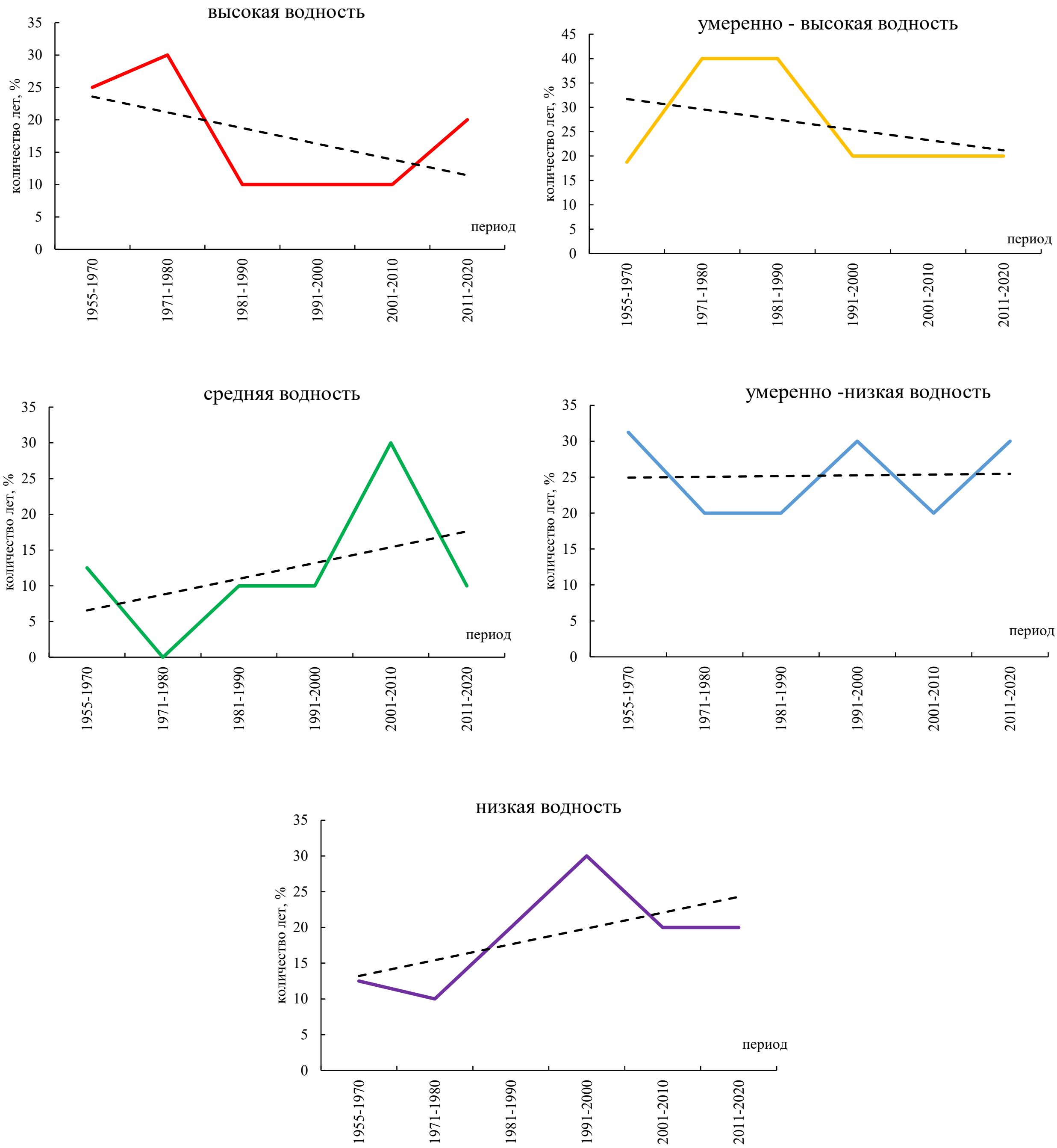


Рисунок 2.6 - Тренды количества лет различной водности суммарного стока Обы и Ульби по десятилетиям (%)

Согласно рис.2.6 линия тренда указывает на понижение высокой и умеренно-высокой водности в последние десятилетия и напротив, увеличение средней и низкой водности суммарного стока бассейнов рек Оба и Ульби.

В таблице 2.10 наглядно представлена водность рассматриваемых рек не по пяти, а по трем градациям: выше нормы – менее 40 %, средняя водность – 40 – 60 %, ниже нормы – более 60 %.

Таблица 2.10 – Количество лет различной водности за период 1955 -2020 гг.

Водность	р. Оба – с. Шемонаиха	р. Ульби – с. Ульби Перевалочная	Суммарный сток
Выше нормы (менее 40%)	30	29	29
Средняя водность (40-60%)	8	8	7
Ниже нормы (более 60%)	28	29	30

Как видно из табл. 2.10, если использовать только три градации водности, то количество маловодных лет одинаково с количеством многоводных лет на обоих исследуемых бассейнах.

Составлена таблица лет (табл.2.11) экстремально низкой и высокой водности. Экстремально маловодными годами являются те годы, при которых значение обеспеченности среднегодового расхода выше 90 %. Обеспеченность среднегодового расхода воды при экстремально высокой водности превышает 10 %.

Таблица 2.11 – Годы экстремально высокой и низкой водности

	р. Оба – с. Шемонаиха		р. Ульби – с. Ульби Перевалочная		Суммарный сток	
Год	Расход воды, $м^3/с$	Обеспечен-ность, %	Расход воды, $м^3/с$	Обеспечен-ность, %	Расход воды, $м^3/с$	Обеспечен-ность, %
1	2	3	4	5	6	7
Высокая водность						
1958	255	6.23	160	1.43	415	2.73
1	2	3	4	5	6	7
1960			131	8.44	367	8.23
1966			149	2.75	385	5.40
1969			130	8.87		
1973	246	8.07			366	8.39
1979	250	7.25	154	2.15	404	3.49
1990	251	7.04			375	6.98
2013	252	6.84	147	2.99	399	3.95
Низкая водность						
1963			62.8	94.2		
1974			56.2	97.9	181	91.9
1982			67.2	90.1		
1998	104	95.8				
1999	103	96.1	66.6	90.6	170	95.1
2000	109	93.8			178	92.8
2003	110	93.2	55	98.3	166	95.9
2008	115	90.6			184	91
2011	114	91.1				
2012	101	96.7	55.3	98.2	156	97.5
2020			66	90		

Согласно результатам табл. 2.11 десятилетия с 1998 г. отличаются увеличением количества экстремально маловодных лет, тогда как экстремально высокая водность приходится в основном на 60 – 70-е гг. прошлого века.

Таким образом, сток зависит от многих факторов, и сложно уловить определенную очередность многоводных и маловодных. Однако, на рассматриваемых реках часто наблюдаются периоды лет с низкой водностью и с водностью выше средней. Длительность таких периодов от 2 до 5 лет.

3.4 Приток речных вод в Шульбинское водохранилище

Из рисунка 1 (Приложение Г) можно заметить, что разностная интегральная кривая притока речных вод рек Оба и Ульби практически повторяет кривую р.Оба. Это можно объяснить бóльшим вкладом р.Оба в приток в Шульбинское водохранилище по сравнению с вкладом р.Ульби. В процентном соотношении сток р.Оба составляет от 55 до 70 % (в среднем 64 %) от общего притока этих рек. Наибольшие отклонения от средней величины вклада наблюдались в 1998 и 2017 гг.

В 1998 году на р.Оба среднегодовой расход воды составил 104 м^3/с (вероятность превышения 96 %, т.е. наблюдалась экстремально низкая водность), в то время как на р. Ульби водность не была такой низкой. Сток составил 84.6 м^3/с (вероятность превышения 61 %, т.е. наблюдалась умеренно низкая водность). Вследствие экстремально низкой водности р.Оба, общий вклад ее стока в этом году составил всего 55 % от суммарного стока (табл.2.10).

В 2017 году, напротив, на р.Оба наблюдалась умеренно-высокая водность (191 м^3/с, обеспеченность 30 %), а на р.Ульби – умеренно-низкая водность (83 м^3/с, обеспеченность 67 %). Вследствие низкой водности на р.Ульби в данном году общий вклад ее стока в этот год составил всего 30 %, а р.Оба – 70 % от суммарного стока (табл.2.10). На рисунке 2.7 представлен вклад рек Оба и Ульби в суммарный приток в Шульбинское водохранилище в виде столбчатой диаграммы, а на рис.2.8 – средний вклад (%) каждой их рек в различные по водности годы.

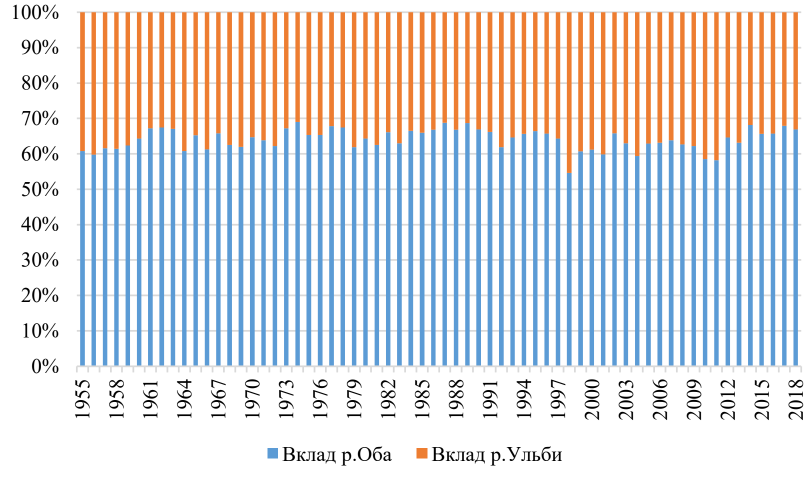


Рисунок 2.7 - Процентное соотношение вклада рек Оба и Ульби в приток в Шульбинское водохранилище

Таблица 2.10 – Отклонения стока от средней величины за 1998 и 2017 годы

река	Qср., м^3/с	Вероятность превышения, %	Водность	Общий вклад, %
1998 год				
Оба	104	96	Экстремально-низкая	55
Ульби	84.6	61	Умеренно-низкая	45
2017 год				
Оба	191	30	Умеренно-высокая	70
Ульби	83	67	Умеренно-низкая	30

Далее на рис.2.8 представлена диаграмма процентного соотношения вклада рек Оба и Ульби в приток в Шульбинское водохранилище в зависимости от водности рек за исследуемый период.

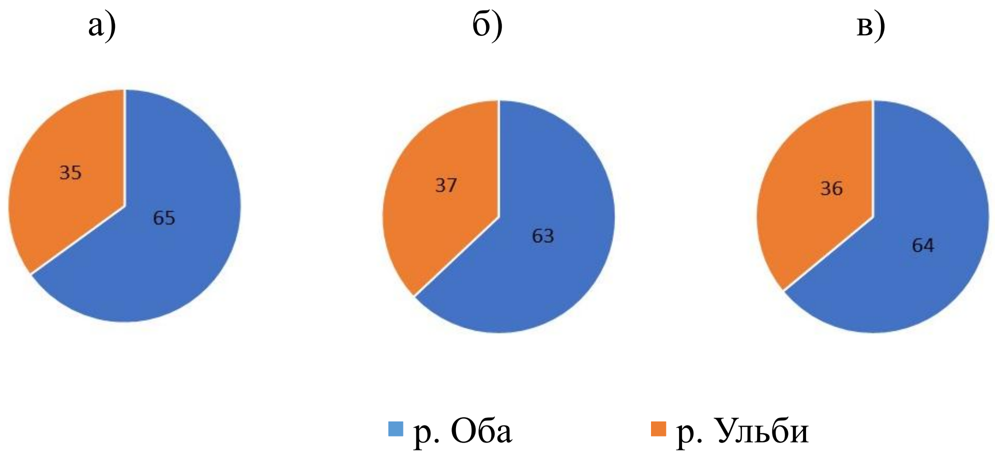


Рисунок 2.8 - Процентное соотношение вклада рек Оба и Ульби в приток в Шульбинское водохранилище в зависимости от водности рек (а) водность выше средней, б) средний по водности, в) водность ниже средней) за исследуемый период.

Таким образом, вклад реки Оба в поступление речных вод в Шульбинское водохранилище в среднем составляет 64 % и остается доминирующим вне зависимости от условий водности. Однако соотношение между реками может значительно варьироваться в отдельные годы, в зависимости от гидрологических условий в каждом конкретном водосборе.

3.5 Анализ снегонакопления

Климат Горного Алтая раннее описанный в главе 1 данной работы, характеризуется континентальным. Различия в климатических особенностях отдельных районов Алтая обусловлены сложной орографией, присутствием замкнутых котловин и плоскогорий.

Среднегодовая температура колеблется от +3,0°C до -3,6°C в равнинных и предгорных районах до -6°C до -7°C в высокогорных районах [29, 30].

Холодный период, когда температура падает ниже 0°C, начинается в конце октября, а в высокогорных районах - в сентябре, и заканчивается в конце марта - начале апреля, а в высокогорных районах - в конце мая. Безморозный период обычно длится 180-210 дней.

На распределение атмосферных осадков по территории существенно влияет орография и высота местности. В горных районах бассейнов Ульби и Обы осадки равномерно распределены в течение года. Процентное соотношение осадков в теплый период (апрель-октябрь) к году здесь снижается до 55-60%. В равнинных, холмистых и межгорных котловинах мало осадков зимой, в то время как на горных склонах их количество выше, и они переносятся ветром, создавая разную картину образования снежного покрова.

Первые снегопады и неустойчивый снежный покров появляются в сентябре, а в высокогорных районах - в конце августа - начале сентября.

Изучение того, как образуется снежный покров, как он распределяется на территории, и особенно определение количества снега в конце зимы до начала таяния в речных бассейнах, является важным научным и практическим вопросом. Это связано с тем, что снегозапас является основным фактором, влияющим на формирование весеннего стока.

Максимальный снегозапас — это наибольшее количество воды, содержащееся в твердом и жидком виде в снежном покрове в момент максимального его накопления. Снежный покров представляет собой сложное явление, которое постоянно меняется в пространстве и во времени. Недостаточная сеть станций и постов усложняет задачу сбора данных о снегозапасе, но она остается важной и актуальной.

Основные климатические факторы, влияющие на снегонакопление, это количество осадков, температура воздуха холодного периода и ветер. Для анализа режима снегонакопления использовались декадные данные снегомерных съемок, средние месячные суммы твердых осадков и среднемесячные температуры холодного периода (ноябрь - март) за период 1979 - 2020 гг., полученные от Казгидромета по МС Лениногорск и Шемонаиха. На МС Усть-Каменогорск снегосъемка отсутствует.

В данной работе термин «максимальный снегозапас» подразумевает наибольший запас воды в снежном покрове за отдельную зиму. Далее в таблице 2.12 представлены статистические характеристики снегозапасов, осадков и температуры холодного периода, рассчитанные автором за период с 1979 по 2020 гг. для МС Лениногорск и Шемонаиха. Полученные данные были сравнены с данными справочника по климату [30, 31], где использовался период наблюдений на МС Лениногорск и Шемонаиха с 1936 по 1960 гг.

Таблица 2.12 - Статистические характеристики снегозапасов (S), осадков (P) и температуры (T) холодного периода

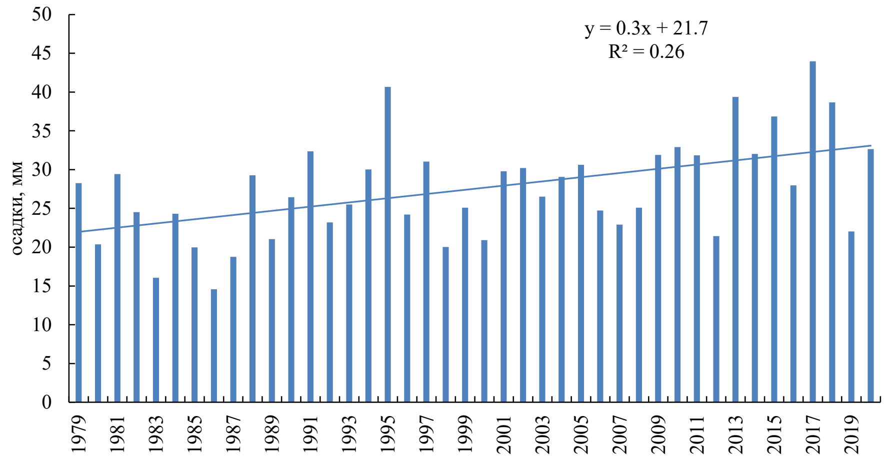
МС	Снегозапас, S, наибольший за зиму, и его статистические характеристики				Многолетняя сумма осадков холодного периода. P, и ее статистические характеристики				Многолетняя средняя месячная температура холодного периода, T, и ее статистические характеристики			
	S	S*	σ	C_v	P	P*	σ	C_v	T	T*	σ	C_v
Лениногорск	123	100	38	0.31	156	124	34	0.22	-8.9	-9.0	1.7	0.19
Изменение	19%		-	-	22%		-	-	0,1 ^{0}C		-	-
Шемонаиха	165	124	72	0.43	168	125	42	0.25	-10.6	-11.5	2.2	0.21
Изменение	25%		-	-	26%		-	-	0,9 ^{0}C		-	-

Примечание: * - данные из справочников [30, 31], σ – среднеквадратическое отклонение, C_v – коэффициент вариации

Согласно таблице 2.12, межгодовая изменчивость максимальных снегозапасов, являющаяся одним из главных факторов вариации объемов воды, поступающих на водосбор для МС Лениногорск, составляет 0.38 а для МС Шемонаиха 0.43. Изменчивость осадков и температура слабая (C_v < 30%). Сравнение характеристик наибольших снегозапасов, осадков и температур на МС Лениногорск и Шемонаиха за холодный период года в периоды 1936 по 1960 гг. [30, 31] и 1979-2020 гг. (расчет на основе данных Казгидромета), позволяет сделать вывод о том, что на МС Лениногорск и Шемонаиха наблюдается увеличение наибольших за зиму снегозапасов на 19 и 25 % (соответственно) на фоне возрастающих средних температур (0,1 – 0,9 ^{0}C) и осадков (22-26 %) холодного периода (табл. 2.12).

Средние за холодный период осадки за последние 30 лет на МС Лениногорск (табл. Г.5) имеют тенденцию к увеличению, а на МС Шемонаиха (табл. Г.6), напротив, – к уменьшению (рис.2.9). Значение показателя средних многолетних осадков за холодный период года по исследуемым станциям увеличилось по сравнению с периодом 1936-1960 гг (табл.2.12).

а)



б)

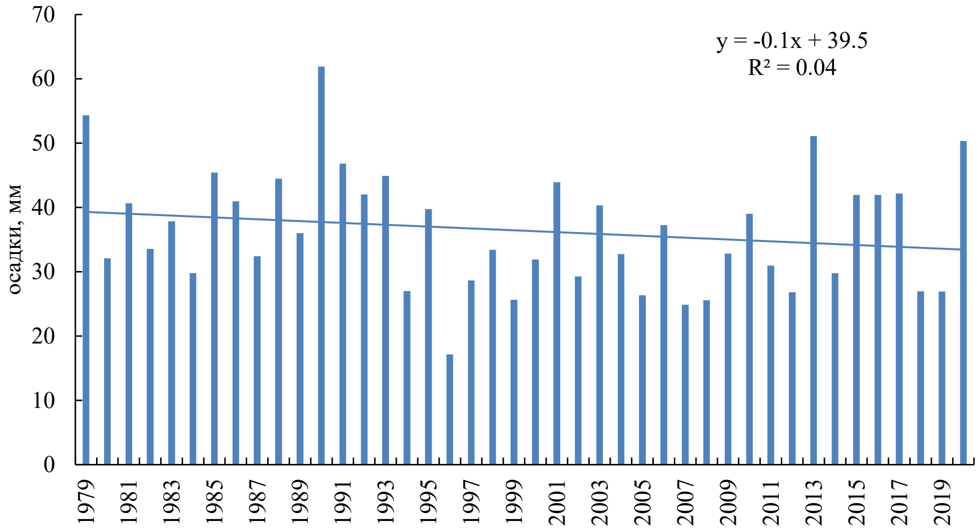
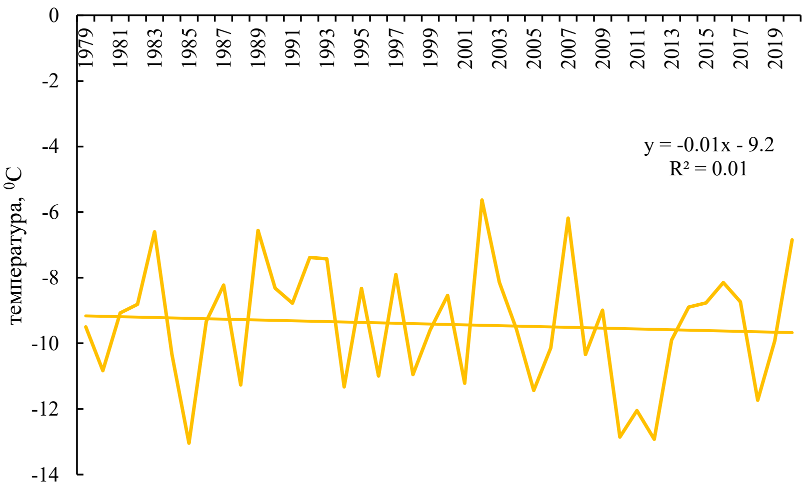


Рисунок 2.9 - Средние за холодный период осадки для МС Лениногорск (а) и Шемонаиха (б) за период 1979 - 2020 гг.

В динамике температур за период 1979-2020 ситуация следующая: на МС Лениногорск (табл.Г.7) средняя температура холодного периода характеризуется понижением линии тренда, а на МС Шемонаиха (табл.Г.8), напротив, – повышением, однако эти изменения статистически незначимы (рис.2.9). Как видно из таблицы 2.11, средняя многолетняя температура холодного периода по обоим станциям повысилась по сравнению с 1936-1960 гг.

а)



б)

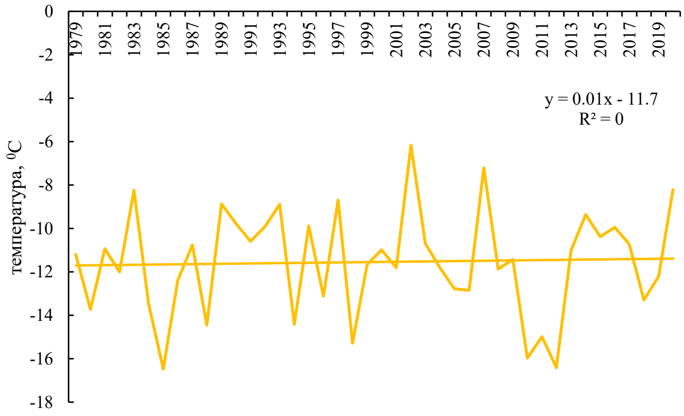
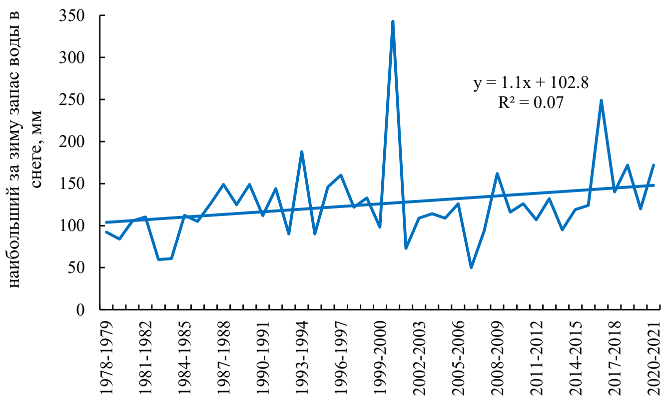


Рисунок 2.9 - Средняя многолетняя температура холодного периода для МС Лениногорск (а) и Шемонаиха (б) за период 1979 - 2020 гг.

На рисунке 2.10 представлены графики наибольшего за зиму запаса воды в снеге для МС Лениногорск и Шемонаиха (табл.Г1 Приложения Г), статистически значимые линии трендов которых указывают на тенденцию роста запаса воды в снеге за последние 30 лет.

а)



б)

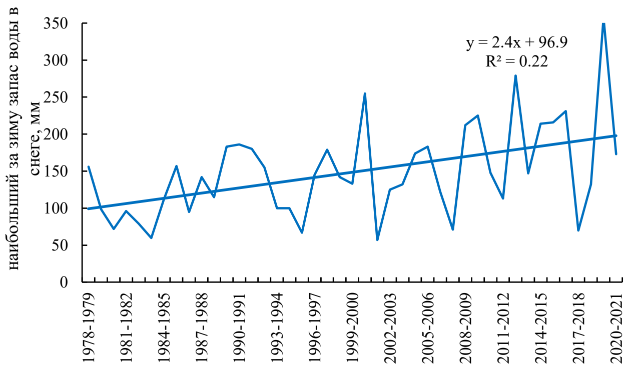
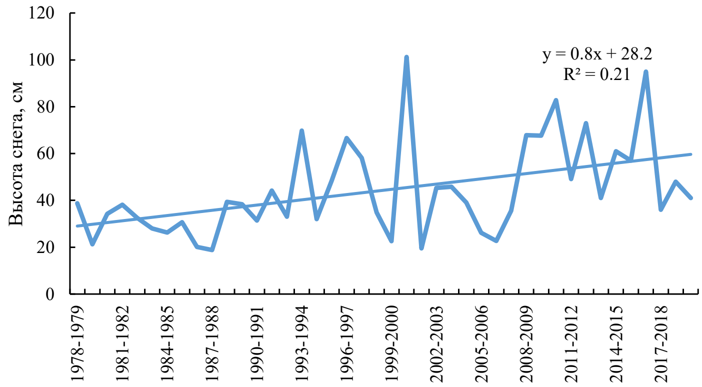


Рисунок 2.10 - Графики наибольшего за зиму запаса воды в снеге для МС Лениногорск (а) и Шемонаиха (б) за период 1979 - 2020 гг.

Автором собраны данные высоты снега по снегосъёмкам на последний день декады, далее рассчитано максимальное значение за зиму (табл.Г2 Приложения Г). Графики наибольшей средней декадной высоты снежного покрова для МС Лениногорск и Шемонаиха также указывают на тенденцию роста высоты снега за последние 30 лет (рис. 2.11).

а)



б)

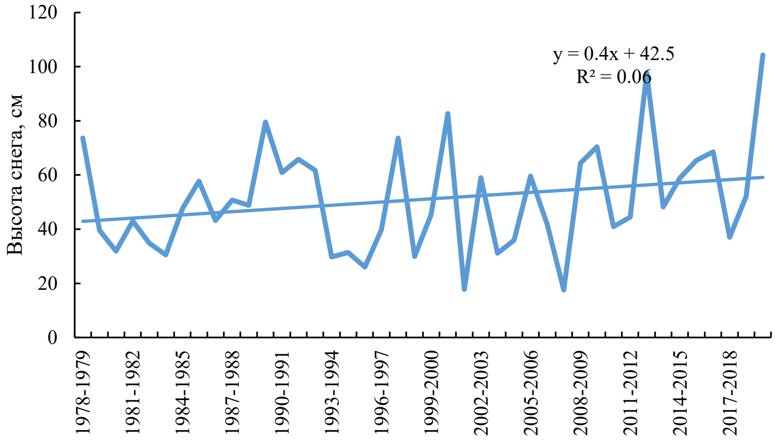


Рисунок 2.11 - Графики наибольшей средней декадной высоты снежного покрова для МС Лениногорск (а) и Шемонаиха (б) за период 1979 - 2020 гг.

Автором представлены графики дат разрушения устойчивого снежного покрова (табл.Г3 Приложения Г) для МС Лениногорск и Шемонаиха (рис. 2.12).

а) б)

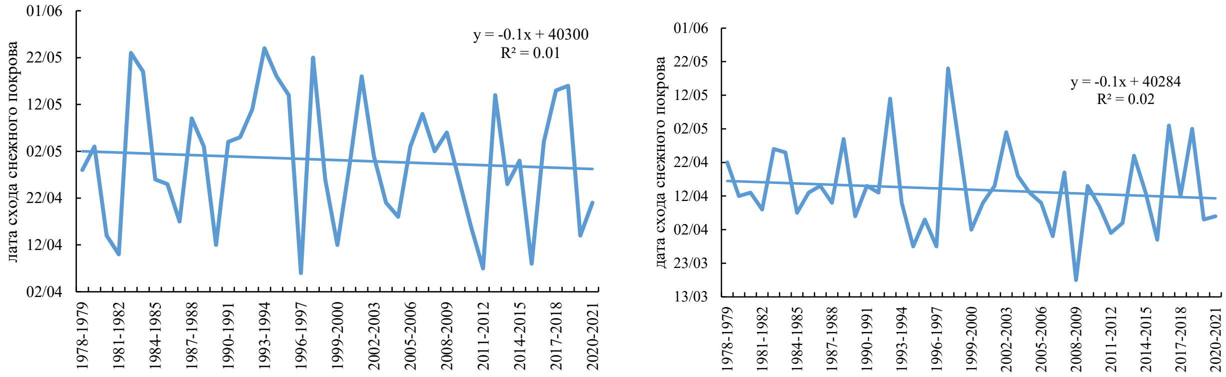
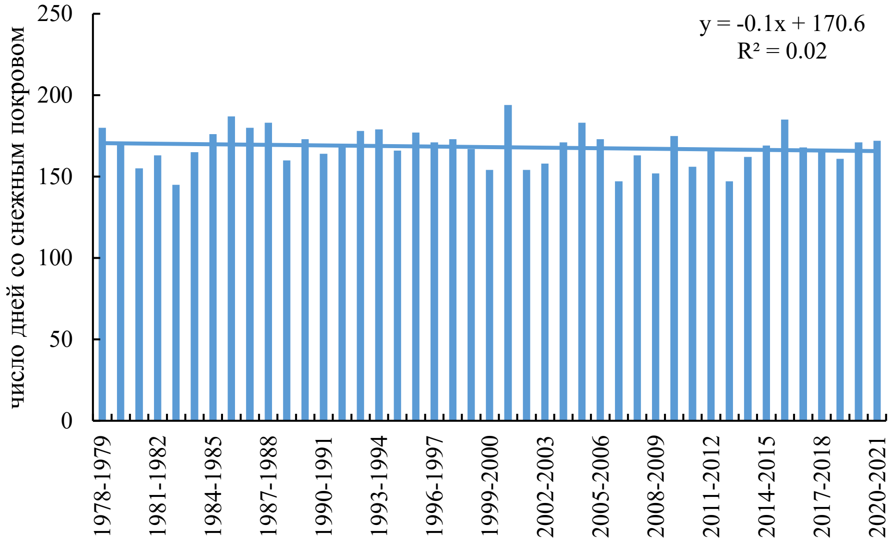


Рисунок 2.12 - Графики дат разрушения устойчивого снежного покрова для МС Лениногорск (а) и Шемонаиха (б) за период 1979 - 2020 гг.

Анализ рядов с датами начала снеготаяния (рис. 2.12) выявил наличие тенденции к сдвигу на более ранние сроки для обоих метеорологических станций.

Гистограммы числа дней со снежным покровом (табл. Г4 Приложения Г) указывают на тенденцию уменьшения, хотя и не значительную(рис.2.13).

а)



б)

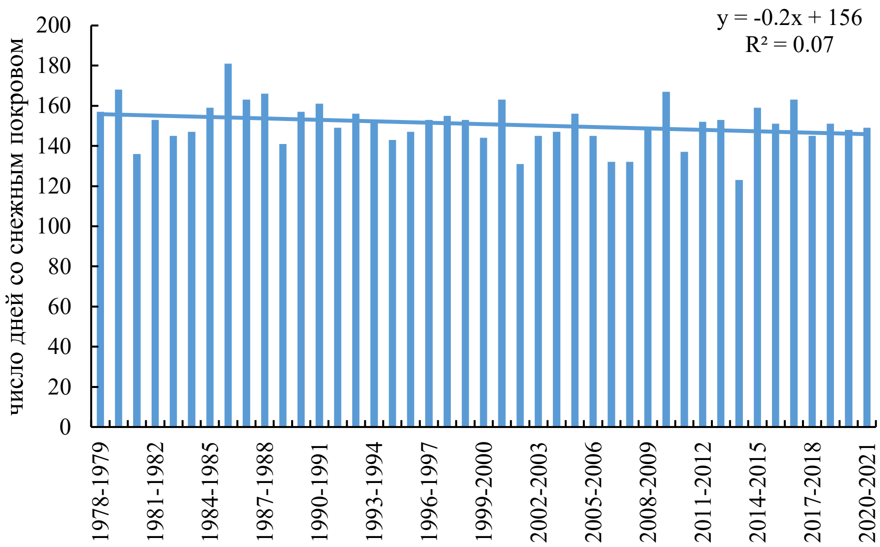


Рисунок 2.13 - Число дней со снежным покровом для МС Лениногорск (а) и Шемонаиха (б) за период 1979 - 2020 гг.

Таким образом, за исследуемый период (1979-2020 гг.) многолетние средние месячные значения температуры воздуха холодного периода повысились, осадки холодного периода увеличились, средние из наибольших за зиму снегозапасы возросли на всех метеостанциях по сравнению с 1936-1960 гг.

Отмечается тенденция на увеличение снегозапасов на обоих исследуемых станциях. Сроки схода снежного покрова по режимным наблюдениям изучаемой территории на обоих станциях имеют тенденцию к сдвигу на более ранние сроки. Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о заметных изменениях в условиях формирования снегозапасов в бассейнах Оби и Ульби за последние 30 лет.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГРАФА СТОКА РЕК ОБА И УЛЬБИ

В данном разделе даются результаты моделирования гидрографа стока рек Оба и Ульби, описание входных данных для моделирования, сравнительный анализ данных метеорологических наблюдений за климатом с WATCH, а также результаты калибрации и валидации гидрологических параметров моделей SWIM и HBV для исследуемых рек и моделирование высоких индексов расхода воды Q10 и Q5.

4.1 Краткое описание модели SWIM

Модель SWIM является интегрированной моделью гидрологических и гидрохимических процессов на водосборах. SWIM представляет собой основанную на эколого-гидрологических процессах модель, включающую математическое описание гидрологического цикла, процессов роста растительности и круговорота питательных веществ, а также процессов эрозии в масштабе речного бассейна. Модель SWIM основана на двух ранее разработанных моделях: SWAT [38] и MATSALU [39]. Подробное описание модели представлено в статьях В. Крысановой и др. [8, 40]. Схема расчета в программном обеспечении SWIM представлена на рисунке Д1 Приложения Д. Входными данными модели являются карты цифровой модели рельефа, землепользования, почвы и параметризация почв, а также суточные осадки, солнечная радиация, относительная влажность воздуха, минимальная, максимальная и средняя температуры воздуха. Можно также добавить данные по управлению водными ресурсами и управлению посевами. В модели используется трехуровневая схема дезагрегации: водосборный бассейн – подбассейн (суббассейн) - гидротопы. Бассейн площадью в пределах 100 - 10 000 км^2 сначала делится на подбассейны, что можно легко сделать с помощью программы "r.watershed" в GRASS (или любой другой ГИС с аналогичными возможностями), которая применяется к цифровой модели рельефа территории с определенным порогом. После этого в каждом подбассейне выделяются гидротопы или элементарные единицы, основанные на землепользовании и типах почв. Гидротоп представляет собой набор не связанных между собой единиц в суббассейне, которые имеют уникальное землепользование и тип почвы. Можно считать, что гидротоп ведет себя гидрологически однородно в пределах суббассейна.

Модель SWIM состоит из нескольких модулей, которые взаимодействуют между собой:

1) Гидрологический модуль: моделирует формирование стока воды в бассейне реки, учитывая характеристики почв, землепользования и климата. Этот модуль также учитывает топографические и водохозяйственные характеристики бассейна, включая средние высоты и уклоны суббассейнов, плотность растительности, коэффициент проницаемости почвы, емкость почвы для удержания воды и т.д.

2) Модуль растительности (включая сельскохозяйственные культуры)

3) Модуль эрозии почвы: оценивает в динамическом режиме уровень эрозии почвы в бассейне реки на основе свойств почвы, склонов, плотности растительности и климатических условий. Этот модуль также оценивает потери почвы и наносы на поверхность почвы в результате эрозии.

4) Модуль потоков питательных веществ: азота (аммонийный азот, нитратный азот, органический азот) и фосфора (фосфатный фосфор, органический фосфор) определяет распределение и перенос питательных веществ в почвах и растительном покрове и их поступление в водоемы. Этот модуль учитывает различные процессы, такие как выщелачивание и сорбция, которые влияют на движение питательных веществ через почву и растительный покров.

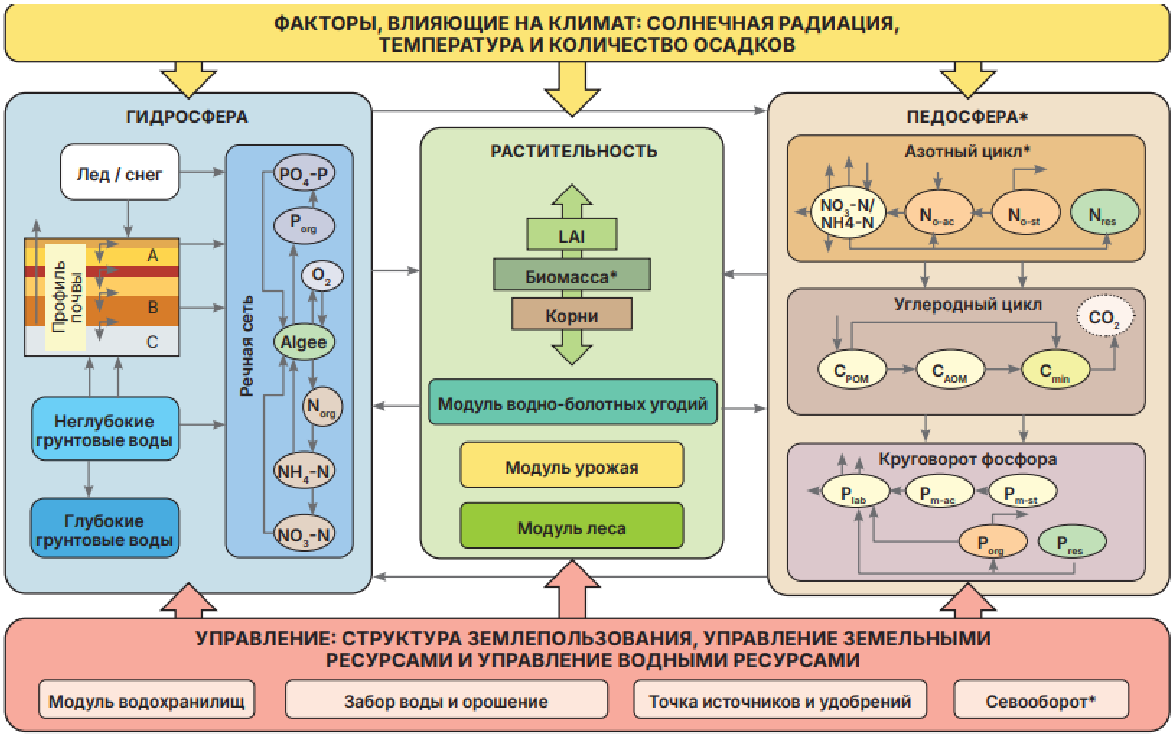
5) Модуль руслового стока учитывает влияние гидродинамических процессов на характеристики стока, такие как расход воды, уровень воды, скорость потока и концентрация загрязнений. Модуль руслового стока включает в себя уравнения Навье-Стокса, которые описывают движение жидкости в канале, а также уравнение неразрывности, которое описывает сохранение массы жидкости. Для работы модуля руслового стока необходимы данные о геометрии русла, включая его форму, размеры и наклон, а также данные о гидродинамических свойствах воды, такие как ее вязкость и плотность. Кроме того, необходимы данные о входящих в русло потоках воды и загрязнений.

6) Географический информационный модуль (ГИС): используется для обработки пространственных данных и подготовки информации для других модулей. ГИС предоставляет данные о топографии, климатических станциях (реальных и виртуальных), почве и землепользовании на водосборном бассейне.

7) Модуль управления данными: управляет обработкой данных и выводом результатов моделирования.

8) Интерфейс пользователя: обеспечивает пользователю доступ к модели SWIM и позволяет настраивать параметры моделирования.

Структура модели SWIM достаточно сложна (рис.3.1), так как она включает в себя множество различных факторов, влияющих на сток воды и другие процессы в бассейнах рек. Однако, благодаря этой сложной структуре, модель SWIM может быть использована для решения широкого спектра задач.



Биомасса – совокупная масса растительных и животных организмов, присутствующих в биогеоценозе определенного размера или уровня. Педосфера – часть поверхности Земли, покрытая слоем почвы. Азотный цикл (Круговорот азота) – биогеохимический цикл азота. Большая его часть обусловлена действием живых существ. Севооборот – научно обоснованное чередование сельскохозяйственных культур и паров во времени и на территории или только во времени.

Рисунок 3.1 - Структура модели SWIM

Гидрологический модуль (рис.3.1, 3.2) основан на уравнении водного баланса (уравнение 1), учитывающем осадки, эвапотранспирацию, перколяцию, поверхностный сток и подповерхностный сток для разреза почвы, разделенного на несколько слоев. Водный баланс для мелководного водоносного слоя включает пополнение запасов воды, капиллярный подъем в почвенный профиль, боковой поток и перколяцию в глубокий водоносный слой почвы.

$$SW(t+1) = SW(t) + PRECIP - Q - ET - PERC - SSF \qquad (1)$$

где SW(t) – дневное (t) содержание воды в почве, PRECIP - осадки, Q – поверхностный сток, ET - эвапотранспирация, PERC - перколяция и SSF - подповерхностный сток.

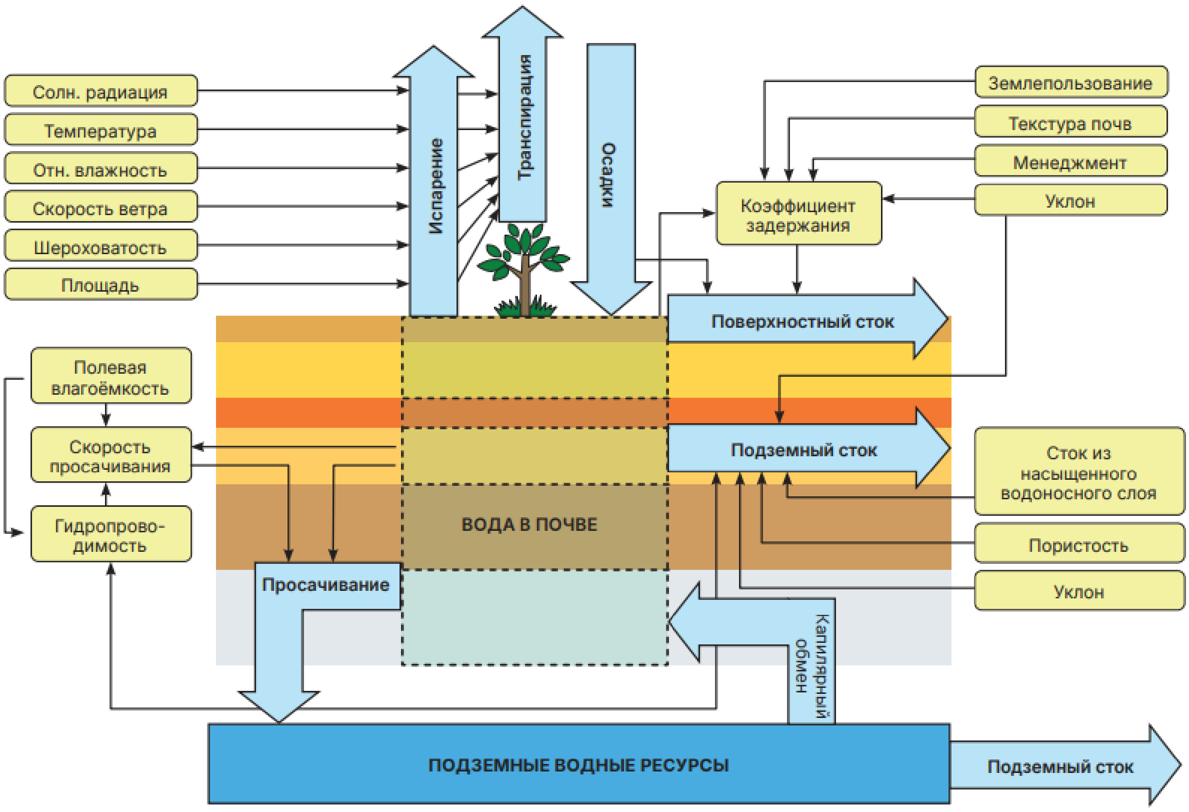


Рисунок 3.2 – Гидрологические процессы в SWIM

Компонента таяния снега рассчитывается с помощью простого уравнения градус-дня. Растаявший снег затем обрабатывается так же, как и осадки, для дальнейшей оценки стока и перколяции.

Потенциальная эвапотранспирация оценивается с использованием метода Пристли-Тейлора [42], который требует такие входные данные как солнечная радиация и температура воздуха. Вместо этого можно использовать метод Пенмана-Монтейта [43], если дополнительно могут быть предоставлены данные о скорости ветра и относительной влажности воздуха.

Объем стока оценивается с помощью модификации метода числа кривых SCS [44]. Поверхностный сток прогнозируется как нелинейная функция осадков и коэффициента задержания. Последний зависит от содержания воды в почве, землепользования и типа почвы.

Нисходящий сток возникает при превышении полевой емкости почвенного слоя и до тех пор, пока нижележащий слой не насыщен. Скорость стока определяется насыщенной гидравлической проводимостью почвенного слоя. Поскольку временной интервал в 1 день является относительно большим для маршрутизации почвенной воды, приток делится в модели на 4 мм слой, чтобы учесть зависимость скорости стока от содержания воды в почве. Если температура почвы в слое ниже 0°C, то перколяция из этого слоя не происходит. Температура почвы оценивается для каждого слоя почвы с использованием температуры воздуха [44].

Боковой подземный сток рассчитывается одновременно с перколяцией. Боковой поток возникает, когда объем хранилища в любом слое превышает емкость поля после перколяции. Нелинейная функция времени движения бокового стока оценивается по насыщенной проводимости и вертикальной эквивалентной гидравлической проводимости.

Компоненты поверхностных, почвенных и грунтовых вод модели состоят из четырех контрольных величин: поверхность почвы, корневая зона, мелководный водоносный слой и глубокий водоносный слой. Перколяция из почвенного профиля предполагает пополнение мелководного водоносного слоя. Обратный поток из мелководного слоя вносит непосредственный вклад в речной сток. Уравнение для возвратного стока было получено из статьи [45], предполагая, что изменение возвратного потока линейно связано со скоростью изменения высоты уровня воды.

Модель SWIM успешно применялась для многих речных бассейнов в Европе, Азии, Африке и Америке, таких как Эльба, Рейн, Дунай, Тагус, Лена, Тарым, притоки Амударьи и Сырдарьи, Голубой Нил, Нигер, Миссисипи, Сан Францизко и т.д. [18, 46, 47, 48, 49, 50, 51].

4.2 Входные данные для модели SWIM (на примере рек Оба и Ульби)

Для калибровки и валидации модели SWIM необходимы следующие исходные данные (табл. 3.1): карты: топографическая карта, карта землепользования и почвенная карта с почвенными параметрами; климатическ vgие или метеорологические данные: с ежедневным шагом по следующим параметрам: средняя, максимальная и минимальная температуры воздуха, суточные осадки, солнечная радиация, относительная влажность воздуха , а также данные речного стока для сравнения с моделируемым стоком. Все необходимые временные ряды были получены за период с 1962 по 2016 год.

В качестве топографических данных использовалась цифровая модель рельефа (ЦМР) с разрешением 90 м, полученная с веб-сайта Shuttle Radar Topography Mission [52]. Данные о землепользовании были получены из базы данных CORINE Land Cover [53], а данные о почвах были загружены из Европейского центра почвенных данных [54]. На основе ЦМР были выделены подбассейны (43 для реки Оба и 23 для реки Ульби) для двух изучаемых водосборов. Путем наложения карт суббассейна, землепользования и почв с помощью программы GRASS GIS в качестве входных данных для модели SWIM была создана дополнительная карта гидротопов (рис.3.3) в каждом суббассейне с их уникальными типами почв и землепользования.

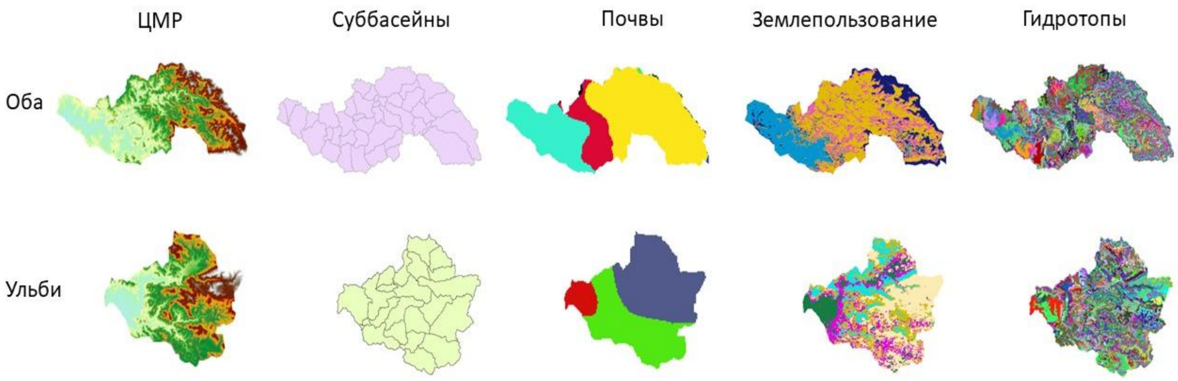


Рисунок 3.3 -Карты исследуемых бассейнов

В качестве климатических данных были использованы климатические данные реанализа WATCH Era-Interim, по причине редкой сети метеорологичсеких станций на исследуемой территории. Для калибровки и валидации модели SWIM также были использованы расходы воды с суточным шагом по гидрологическим постам (с. Шемонаиха и Ульби Перевалочная) в пределах рассматриваемых водосборных бассейнов за период 1961-2016 гг., полученные из Национальной гидрометеорологической службы Казахстана. Список входных данных для модели SWIM представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Список входных данных для модели SWIM

Входные данные	Источник	Разрешение	Литература
Цифровая модель рельефа	Shuttle Radar Topography Mission http://srtm.org/	90 м	[55]
Данные о землепользовании	CORINE Land Cover https://land.copernicus.eu/	100 м	[56]
Данные о почве	Европейский центр почвенных данных https://esdac.jrc.ec.europa.eu/	1000 м	[57]
Климатические данные реанализа WATCH Era-Interim	ISIMIP - The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project https://www.isimip.org/	0,5°	[58]

4.3 Сравнение данных метеорологических наблюдений за климатом с WATCH

Исследуемый регион характеризуется довольно редкой сетью метеорологических станций (МС). Имеется только три станции: одна станция Лениногорск (809 м над ур. м.) в бассейне реки Ульби и близлежащая к водосбору Ульби - МС Усть-Каменогорск (287 м над ур. м.) и одна станция в устье бассейна реки Оба, Шемонаиха (310 м над ур. м.) (рис. 3.3). В горных частях исследуемых бассейнов станции отсутствуют. Поэтому было решено использовать климатические данные реанализа WATCH Era-Interim [59], которые можно легко использовать в качестве исходных данных для модели SWIM. Данные WATCH, с суточным шагом, охватывают весь земной шар с горизонтальным разрешением 0,5°. В пределах нашей области исследования расположены 18 точек сетки (виртуальные метеостанции, см. рис. 3.4). Были использованы следующие ежедневные данные WATCH: средняя, максимальная и минимальная температуры воздуха, осадки, скорость ветра, влажность воздуха и солнечная радиация.

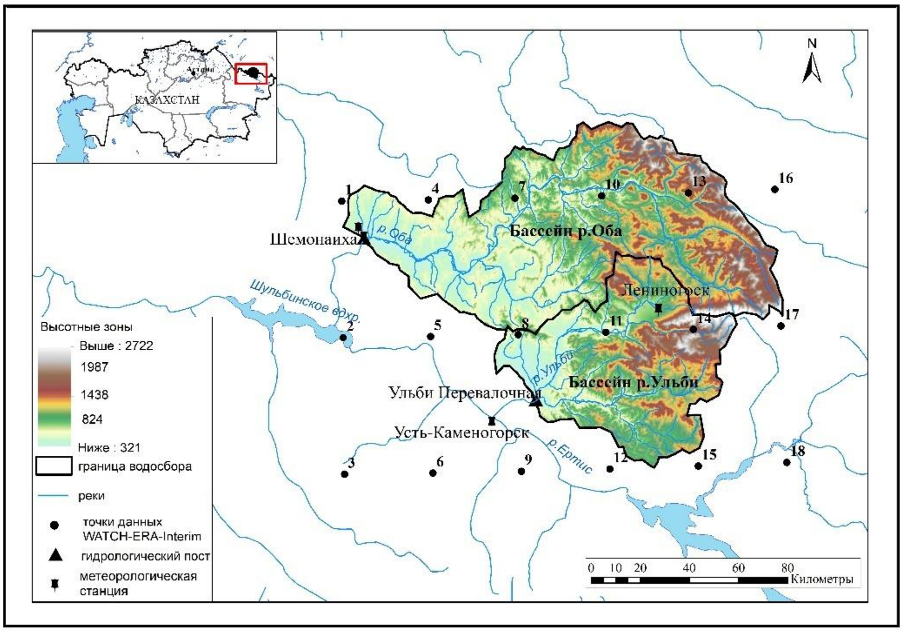


Рисунок 3.4 - Расположение бассейнов рек Оба и Ульби

Перед использованием данных WATCH для моделирования был проведен анализ сопоставимости данных, полученных с трех метеостанций и расположенных рядом с ними виртуальных метеостанций (WATCH). Метеорологические данные: среднесуточная температура воздуха и осадки были собраны с трех наземных метеорологических станций (Лениногорск, Шемонаиха и Усть-Каменогорск), а также загружены данные с близлежащих виртуальных станций с веб-сайта WATCH [60].

Сравнение годовых сумм осадков и среднесуточной температуры воздуха между временными рядами наблюдений с трех метеостанций и ближайшими к ним узлами сетки WATCH оценивалось за период 1980-2016 гг. Результаты корреляционного анализа представлены на рисунке 3.5.

По полученным результатам для станций Лениногорск (R^2 = 0,79) и Шемонаиха (R^2 = 0,81) установлена высокая корреляция между наблюденными годовыми осадками и осадками WATCH. Меньшая корреляция между этими двумя наборами данных была получена для МС Усть-Каменогорск (R^2 = 0,53), что можно объяснить большой разницей в высотах между виртуальной точкой WATCH (659 м) и МС Усть-Каменогорск (287 м). Сравнение наблюденной суточной температуры с температурой во временном ряду WATCH показало высокую корреляцию для всех трех станций, при этом критерий R^2 колебался от 0,95 до 0,97 (см. рис. 3.5).

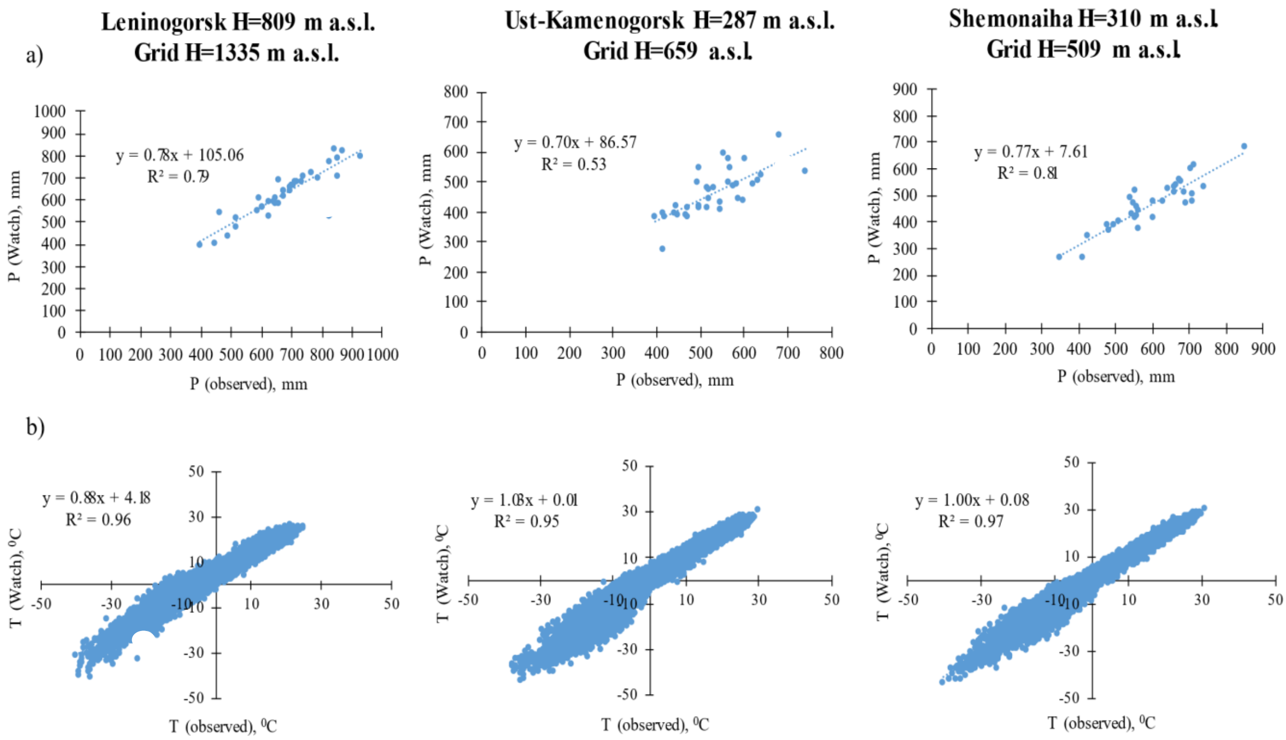


Рисунок 3.5 - Сравнение годовых осадков (а) и среднесуточной температуры (б) климатических данных WATCH с метеорологическими данными наблюдений для станций Лениногорск, Усть-Каменогорск и Шемонаиха за период 1980-2016 гг.

Достаточно высокая корреляция между наблюдаемыми временными рядами и данными WATCH показывает, что метеорологические параметры модели WATCH (18 точек сетки) могут применяться в SWIM для калибровки/валидации и дальнейшего анализа.

4.4 Результаты калибрации и валидации гидрологических параметров модели SWIM для рек Оба и Ульби

Надежность результатов гидрологических моделей водосборных бассейнов напрямую зависит от их способности воспроизводить реальные гидрологические процессы, которые обычно проверяются с использованием процедур калибрации и валидации модели путем сравнения наблюденных данных с выходными моделированными данными. Калибрация обычно представляет собой поиск единого оптимального набора калибровочных параметров, обычно 6 – 10. Калибрация требует временной ряд расхода воды и метеорологические данных за 5-10 лет, а также период калибрации должен включать различные гидрологические годы, как влажные, так и засушливые. Для оценки согласованности смоделированного речного стока с наблюденным стоком используются различные критерии соответствия, такие как визуальная оценка, а также статистические критерии. В данном исследовании для оценки связи между смоделированными и наблюденными расходами воды использовались два статистических критерия: эффективность Нэша-Сатклиффа (NSE) [61] и относительная ошибка объема (RVE):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{t=1}^{T}(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \qquad (2)$$

$$RVE = \left(\frac{\overline{Q_{sim}}}{\overline{Q_{obs}}} - 1\right) \cdot 100 \qquad (3)$$

где Q_{obs} - наблюдаемый месячный или суточный расход воды, $\overline{Q_{obs}}$ - среднее значение наблюдаемого месячного или суточного расхода воды, Q_{sim} - смоделированный месячный или суточный расход воды, а $\overline{Q_{sim}}$ - средний смоделированный месячный или суточный расход воды. NSE — это критерий эффективности, который связывает сумму квадратов разностей между наблюденными и смоделированными расходами с дисперсией наблюденных расходов и варьируется от минус бесконечности до 1.0, где 1.0 указывает на идеальное совпадение. RVE представляет собой общее отклонение между наблюденным и смоделированным объемом расхода воды, выраженное в процентах, и может варьироваться от -100 до плюс бесконечности, где 0 указывает на идеальное соответствие. Значения критериев NSE>0.7, RVE< ±10% соответствуют "хорошей" работе гидрологической модели [62]. После калибрации выполняется валидация (проверка) на другом независимом периоде с теми же параметрами, найденными в процессе калибровки.

В данном исследовании калибрация проводилась для рек Оба и Ульби по данным наблюдений с гидрологических постов Шемонаиха (Оба) и Ульби Перевалочная (Ульби) за период 1962-1971 гг. [63] Валидация обоих водосборов проводилась за 1972–2016 гг., отдельно за четыре десятилетия 1972–1981, 1982–1991, 1992–2001, 2002–2011 и за 2012–2016 гг. (2002 г. исключен для Ульби из-за отсутствия данных наблюдений за стоком). Калибрация выполнялась вручную с последующим уточнением с использованием инструмента автоматической калибрации PEST [64]. Калибрация включала уточнение девяти параметров (табл. 3.2), которые были постоянными по всему бассейну: поправочный коэффициент испарения (ecal), коэффициент базового стока (bff), коэффициент задержки грунтовых вод (abf), два коэффициента маршрутизации (routing) (roc2, roc4), два параметра, связанных с выпадением и таянием снега (tmelt, smrate), а также поправочные коэффициенты для осадков (xgrad) и температуры (tgrad).

Таблица 3.2 - Калибровочные параметры, используемые в модели SWIM для бассейнов Обы и Ульби

№	Параметр	Название	Диапазон значений	Значение параметра для бассейна Обы	Значение параметра для бассейна Ульби
1	2	3	4	5	6
1	ecal	Поправочный коэффициент испарения	0.7-1.3	0.9	0.8
2	bff	коэффициент базового стока	0-1.0	0.01	0.01
3	abf	коэффициент задержки грунтовых вод	0.01-1	0.1	0.1
4	roc 2	Коэффициент маршрутизации	1-100	2.0	6.8
5	roc 4	Коэффициент маршрутизации	1-100	1.0	3.8
6	tmelt	Температура таяния снега	-5 - +5	-4.2	-3.4
7	smrate	Коэффициент объема таяния снега в сутки (мм/день)	-	0.28	0.31
8	xgrad	Поправочный коэффициент осадков	-	0.004	0.003
9	tgrad	Поправочный коэффициент температуры	-	-0.003	-0.004

На рисунках 3.6 и 3.7 показано сравнение смоделированных и наблюденных расходов воды на реках Оба и Ульби с месячным шагом в период калибрации (1962 – 1971 гг.) и в подпериоды валидации (2002 – 2011 гг. для Обы и 1992 – 2001 гг. для Ульби) (слева) и многолетней среднесуточной динамики в течение всего периода калибрации и всего периода валидации (справа). Месячная динамика в период калибрации моделируется достаточно хорошо с NSE = 0,86 и RVE = 5,6% для реки Оба и NSE = 0,84, и RVE = -0,2% для реки Ульби. Периоды валидации представлены 2002-2011 гг. для Обы и 1992-2001 гг.

для Ульби, для которых также получены достаточно высокие показатели (NSE = 0,92, RVE = -0,9% и NSE = 0,96, RVE = -6,1% соответственно).

Среднемноголетняя динамика (рис. 3.6 и 3.7, справа) также моделируется достаточно хорошо для обоих водосборов. Обе реки имеют более высокий сток с апреля по июнь с максимумом в конце апреля или начале мая по причине таяния снега и ледников, а также выпадения большего количества осадков в это время. К примеру, максимальные среднемесячные расходы для рек Оба и Ульби составляли 1157 м3/с (в мае 1979 г.) и 767 м3/с (в мае 1966 г.) соответственно. Остальные месяцы характеризуются более низкими значениями речного стока. Минимальные расходы наблюдаются в зимние месяцы (4–11 $м^3/с$ на Обе и 7 – 10 $м^3/с$ на Ульби), что примерно в 100 раз ниже, чем в мае.

Таким образом, можно сделать вывод, что модель SWIM смогла хорошо воспроизвести месячную и многолетнюю динамику среднесуточного стока для обоих исследуемых речных бассейнов.

Результаты калибрации и валидации по критериям соответствия приведены в табл. 3.3. Результаты калибрации показали хорошее совпадение смоделированных данных с наблюденными на Шемонаихе и Ульби Перевалочной. Результаты валидации с месячным временным шагом для двух бассейнов можно оценить как «очень хорошие» (NSE выше или равен 0,86 для Оба и выше или равен 0,88 для Ульби) в соответствии с классификацией [61] во всех подпериодах валидации.

Таблица 3.3 - Значения эффективности Нэша-Сатклиффа (NSE) и относительной ошибки объема (RVE) для периодов калибровки и проверки с месячным и суточным временным шагом для исследуемых бассейнов.

Река		Период	NSE (шаг: месяц)	RVE, % (шаг: месяц)	NSE (шаг: сутки)	RVE, % (шаг:сутки)
Оба						
	Калибрация	1962-1971	**0.86**	**5.6**	**0.76**	**5.7**
	Валидация	1972-1981	**0.9**	**-2.9**	**0.8**	**-3.0**
		1982-1991	**0.89**	-13.2	**0.8**	-13.2
		1992-2001	**0.86**	**2.2**	0.74	**2.2**
		2002-2011	**0.92**	**-0.9**	**0.81**	**-0.9**
		2012-2016	**0.94**	**-9.6**	**0.9**	**-9.6**
Ульби						
	Калибрация	1962-1971	**0.84**	**-0.2**	**0.76**	**-0.02**
	Валидация	1972-1981	**0.92**	**-4.2**	**0.84**	**-4.2**
		1982-1991	**0.91**	**-3.1**	**0.83**	**-3.0**
		1992-2001	**0.9**	**-3.2**	**0.82**	**-3.1**
		2003-2011	**0.96**	**-6.1**	**0.87**	**-6.0**
		2012-2016	**0.88**	**-3.8**	**0.87**	**-3.8**

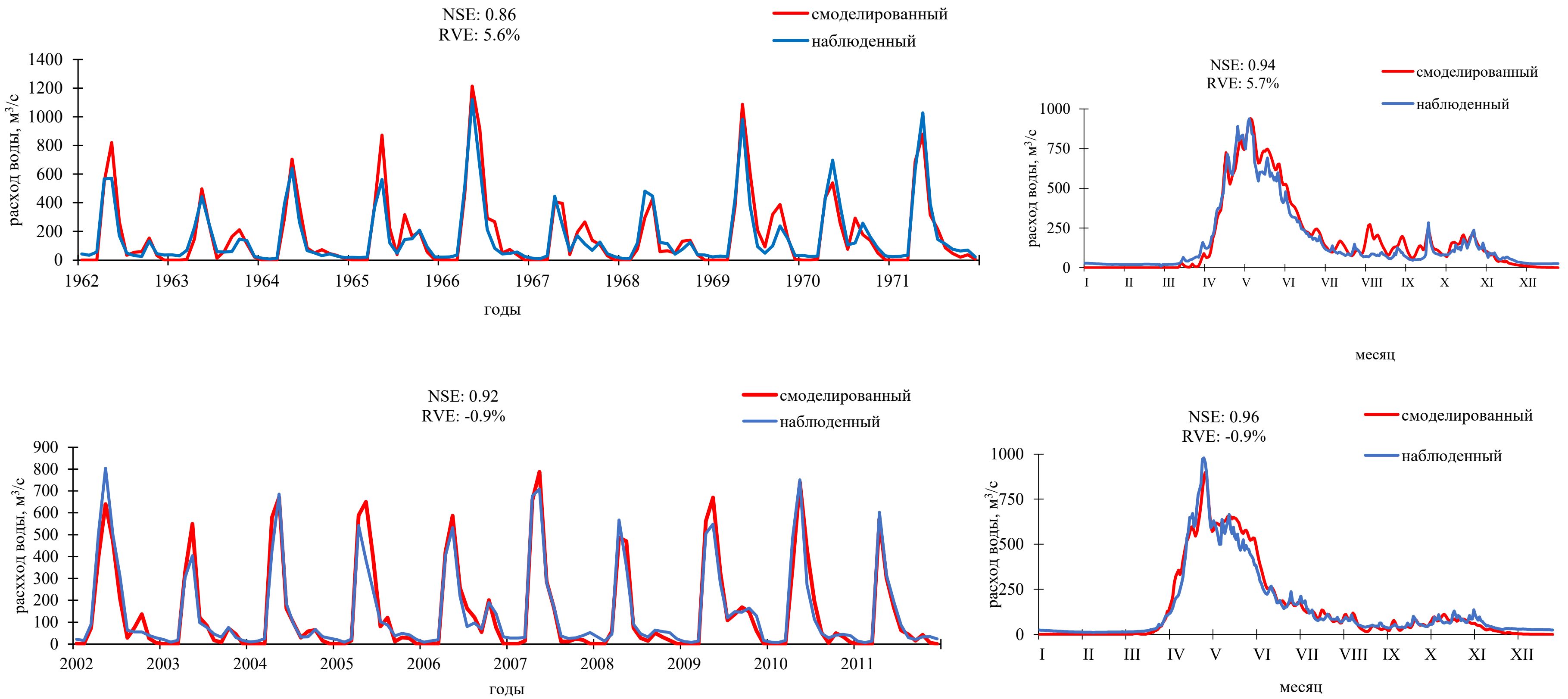


Рисунок 3.6 - Сравнение смоделированного и наблюденного расходов реки Оба, показывающее месячную динамику в период калибрации и в один из подпериодов валидации (слева), а также многолетнюю среднесуточную динамику в течение всего периода калибрации и валидации (справа)

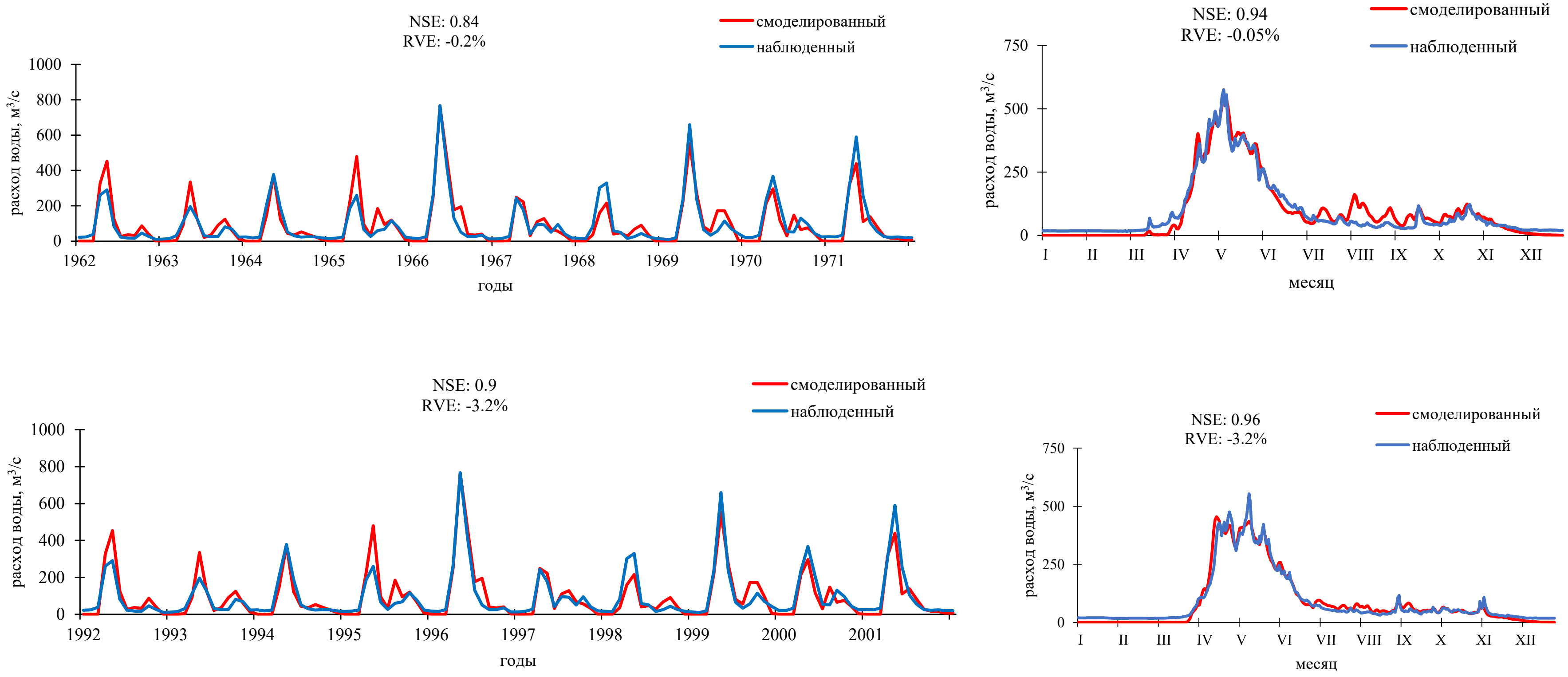
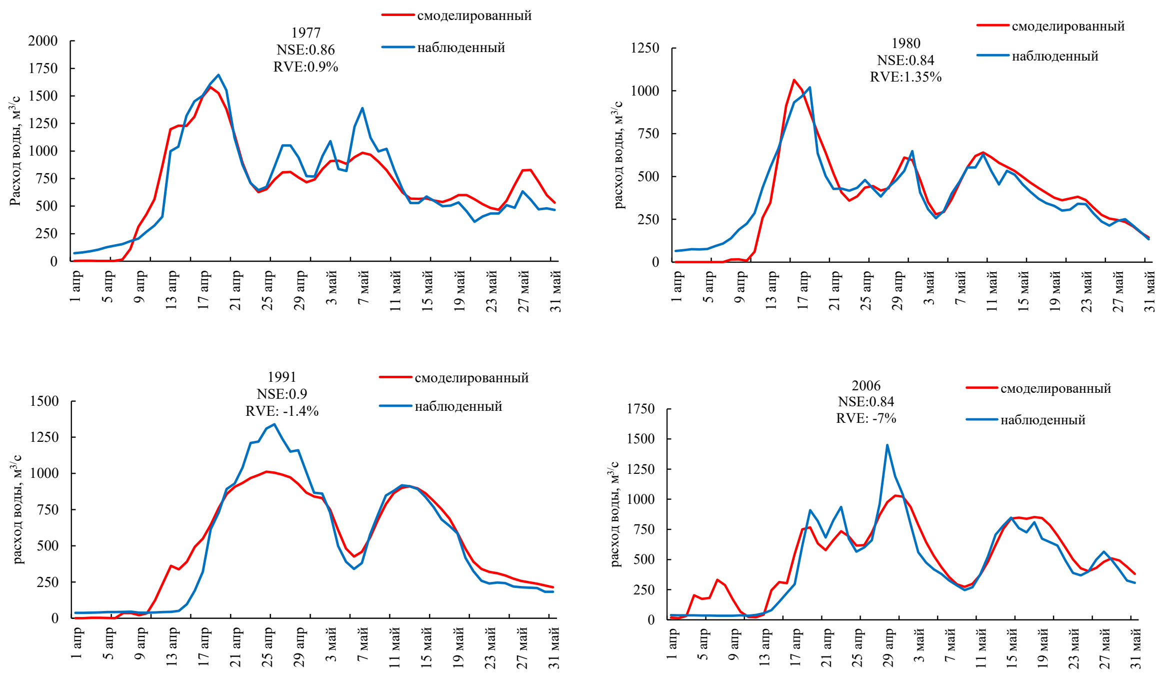


Рисунок 3.7 - Сравнение смоделированного и наблюденного расходов реки Ульби, показывающее месячную динамику в период калибрации и в один из подпериодов валидации (слева), а также многолетнюю среднесуточную динамику в течение всего периода калибрации и валидации (справа)

Результаты калибрации и валидации показывают хорошее совпадение смоделированных с помощью SWIM и наблюденных расходов воды, а также возможность использования данных реанализа WATCH Era Interim для гидрологического моделирования в исследуемом районе. Далее в данной работе автором был рассмотрен максимальный сток на исследуемых бассейнах. На реках Оба и Ульби пик половодья наблюдается весной, а именно в апреле - мае.

а)



b)

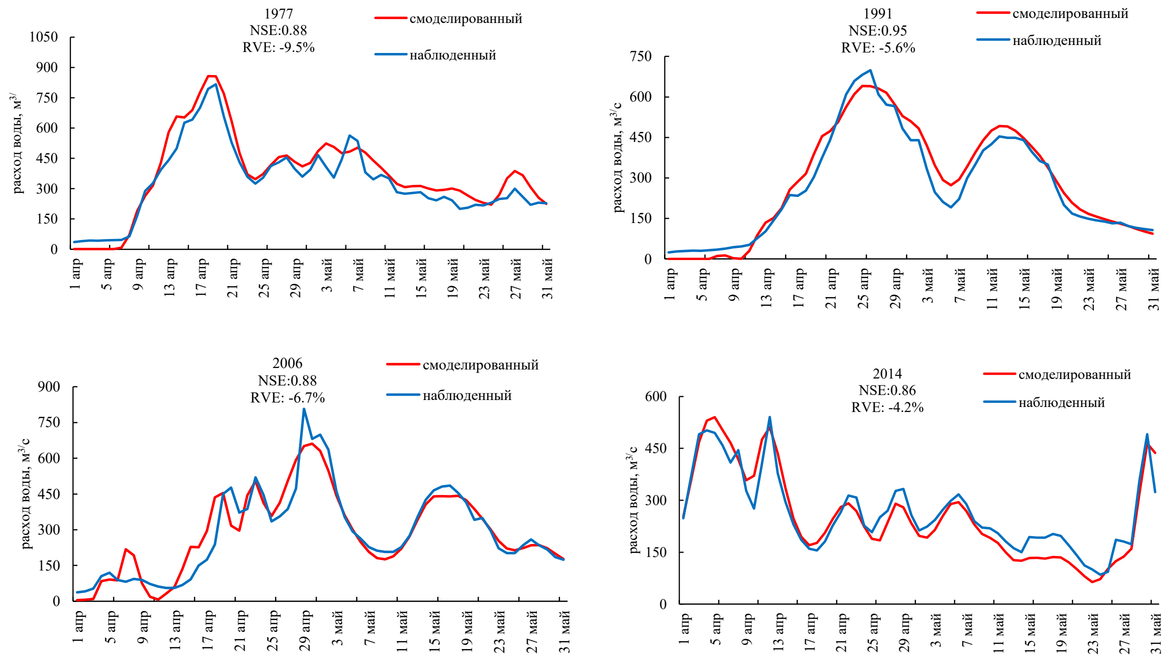


Рисунок 3.8 - Сравнение смоделированных и наблюдаемых стоков рек Оба (а) и Ульби (б) с суточным шагом в пиковые месяцы апрель-май для четырех выбранных лет

На рисунке 3.8 показаны графики, сравнивающие динамику максимального стока в апреле и мае для четырех выбранных лет: 1977, 1980, 1991, 2006 годы для Обы и 1977, 1991, 2006, 2014 годы для Ульби. Обе реки имеют максимальный сток в конце апреля или начале мая, вследствие таяния снега и ледников и выпадения большого количества осадков в этот период. Гидрографы максимального стока показывают хорошее согласие между смоделированными SWIM данными и наблюденным расходом воды. Модель хорошо «улавливает» пики стока, а также сам ход процесса половодья.

Таблица 3.4 - Значения эффективности Нэша-Сатклиффа и погрешности относительного объема для максимального стока в апреле-мае с суточным шагом для исследуемых бассейнов

Река	Год	Эффективность Нэша-Сатклиффа NSE	Относительная погрешность объема RVE, %
Оба	1977	0.86	0.9
	1980	0.84	1.35
	1991	0.9	-1.4
	2006	0.84	-7
Ульби	1977	0.88	-9.5
	1991	0.95	-5.6
	2006	0.88	-6.7
	2014	0.86	-4.2

Анализ полученных значений (табл.3.4) показывает, что точность моделирования для обоих бассейнов можно оценить как высокую. Коэффициент NSE для реки Оба варьируется в диапазоне 0,84–0,90, а для реки Ульби — от 0,86 до 0,95. Согласно классификации эффективности гидрологических моделей [62], значения NSE выше 0,75 свидетельствуют о хорошем соответствии между наблюдаемыми и моделируемыми данными, что подтверждает адекватность используемой модели для воспроизведения динамики весеннего стока. Показатель относительной погрешности объёма (RVE) для обоих бассейнов не превышает ±10 %, что соответствует рекомендованным критериям достоверности гидрологических расчётов. При этом положительные значения RVE (например, 1,35 % для Обы в 1980 г.) указывают на незначительное завышение моделируемого объёма стока, тогда как отрицательные значения (например, –7 % и –9,5 % для отдельных лет) отражают недооценку фактического стока, но в пределах допустимой погрешности.

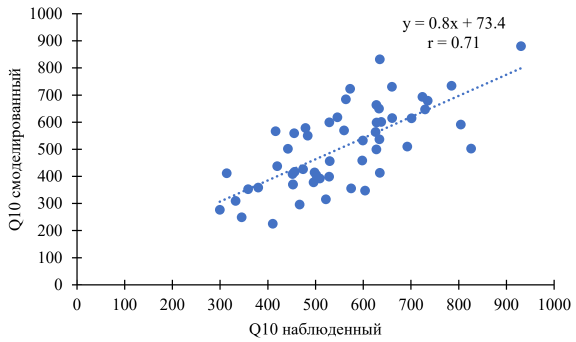
4.5 Моделирование высоких индексов расхода воды Q10 и Q5

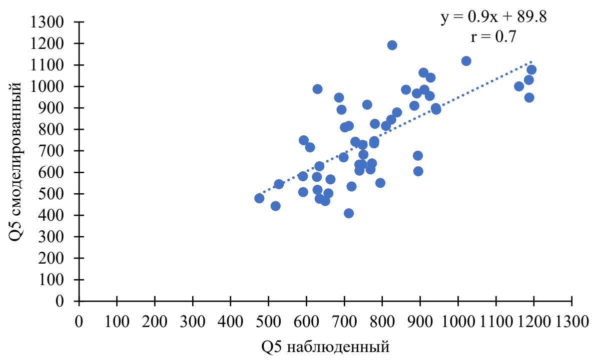
Поскольку реки Оба и Ульби берут свое начало в высокогорьях (> 2700 м над уровнем моря), весенние наводнения создают опасность затопления прибрежных районов. Время наступления максимального уровня паводка зависит от совокупности таких факторов, как время начала снеготаяния и интенсивность его развития, интенсивность роста температуры воздуха на водосборах, а также выпадения жидких осадков. Поэтому дополнительно были исследованы индексы высокого стока Q10 и Q5, соответствующие 90-му и 95-му процентилям [63]. Была применена модель SWIM, прошедшая калибрацию и валидацию, и полученные на выходе данные использовались для сравнения с данными наблюдений на постах. Эти индексы являются надежными индикаторами высокого стока. Q10 — расход в кубических метрах в секунду, который был равен или превышен в течение 10% указанного срока (год, десятилетие и т. д.), а Q5 — расход равен или превышен в течение 5% времени. Положительный (отрицательный) тренд в Q10 и Q5 означает увеличение (уменьшение) опасности наводнений, при этом Q5 более информативен для более экстремальных случаев.

В данном исследовании автор дает оценку насколько хорошо модель SWIM может воспроизвести индексы высокого стока за весь исторический период 1962 – 2016 гг. Для этого индексы Q10 и Q5 были рассчитаны для каждого года всего периода на основе смоделированных временных рядов. На рис. 3.8 показаны взаимосвязи между индексами высокого стока Q10 и Q5 на основе наблюденных и смоделированных временных рядов для обеих рек за период 1962–2016 гг.

Как видно на рис. 3.9, коэффициенты корреляции между показателями высокого стока, оцененными по модельным и наблюденным данным расхода воды, достаточно высоки.

а)





b)

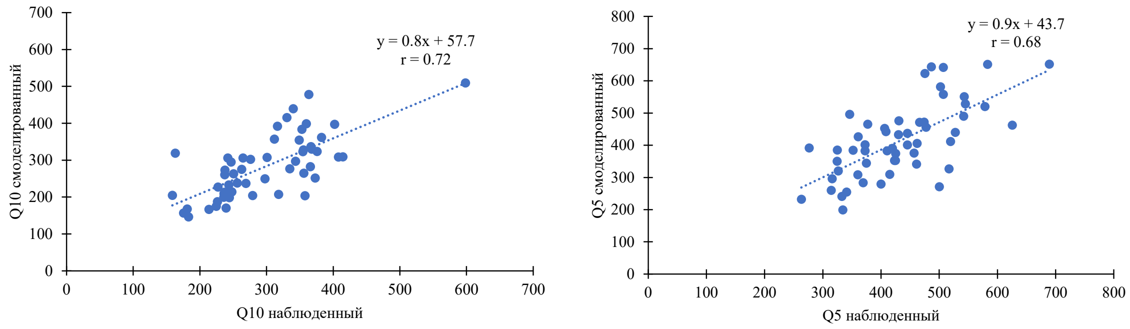


Рисунок 3.9 - Зависимости между индексами стока Q10 и Q5 по данным наблюдений и смоделированным данным с помощью модели SWIM для рек Оба (а) и Ульби (б) за период 1962 – 2016 гг.

Это подтверждает, что модель пригодна для воспроизведения не только суточной и месячной динамики речного стока, но может быть применена и для прогнозирования паводков и, возможно, наводнений, хотя последний случай требует дополнительной проверки.

Таким образом, в данном исследовании модель SWIM была применена для бассейнов рек Оба и Ульби. Сравнение метеорологических данных WATCH Era Interim с наблюдательными метеорологическими временными рядами за период 1980-2016 гг. показало удовлетворительные результаты. В частности, было обнаружено очень хорошее соответствие между смоделированными и наблюдаемыми среднесуточными температурами на трех метеостанциях (с R^2 выше 0,96). Коэффициенты корреляции годовых сумм осадков были несколько ниже (R^2 от 0,60 до 0,95), что может быть связано с разницей высот сравниваемых пунктов. Калибровка и валидация модели SWIM, проведенные за период с 1962 по 2016 г., показали, что модель SWIM может быть надежным инструментом для моделирования речного стока рек Оба и Ульби. Кроме того, анализ индексов высокого расхода Q10 и Q5 на основе смоделированного расхода показал тесную связь с теми же индексами на основе данных измерений расхода.

4.6 Моделирование гидрографа стока рек Оба и Ульби с применением гидрологической модели HBV

Прогнозирование и моделирование речного стока является одним из ключевых инструментов в управлении водными ресурсами, особенно в регионах с выраженной сезонной изменчивостью и растущими климатическими рисками. В условиях изменения климата, проявляющегося через повышение температуры воздуха, изменение характера и распределения осадков, увеличение частоты экстремальных гидрологических явлений, возникает необходимость пересмотра существующих подходов к оценке водных ресурсов и прогнозированию стока.

На территории Восточного Казахстана, где расположены реки Оба и Ульби — основные притоки Шульбинского водохранилища, наблюдается тенденция к изменению режима увлажнения и гидрологических характеристик, что напрямую влияет на эксплуатацию гидротехнических сооружений и безопасность водохозяйственных систем. Повышение эффективности управления стоком в таких условиях требует использования современных численных моделей, способных воспроизводить динамику речных процессов при различных сценариях климатических и антропогенных воздействий.

Одним из наиболее распространённых инструментов концептуального гидрологического моделирования является модель HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) [72], разработанная в Шведском метеорологическом и гидрологическом институте (SMHI) [73]. Простота структуры, адаптивность параметров и возможность использования ограниченного набора входных данных делают её особенно полезной для бассейнов с редкой наблюдательной сетью, к которым относятся многие реки Казахстана.

В настоящей главе рассматривается применение модели HBV для моделирования гидрографа стока рек Оба и Ульби, формирующих боковой приток в Шульбинское водохранилище. Целью является оценка адекватности модели при воспроизведении и прогнозировании стока, а также определение возможностей её дальнейшего использования в условиях изменяющегося климата.

Реки Оба и Ульби играют важную роль в поддержании водного баланса Иртышского каскада водохранилищ. Весеннее половодье, обусловленное таянием снега и ледников, формирует основную часть годового стока и требует точного прогнозирования для эффективного регулирования попусков и предотвращения паводковых рисков. Учитывая, что методы прогнозирования, разработанные в прошлом столетии, часто не отражают изменившиеся гидрометеорологические условия, возникает необходимость в обновлении методологической базы.

Применение модели HBV позволяет воспроизводить гидрологические процессы с учетом пространственного распределения осадков, температуры воздуха и характеристик подстилающей поверхности. Это обеспечивает возможность не только оперативного прогноза стока, но и проведения сценарных расчетов при различных климатических условиях, что делает данную модель актуальной в контексте оценки последствий изменения климата для бассейнов Восточного Казахстана.

Автором была применена концептуальная модели HBV для моделирования гидрографа стока рек Оба и Ульби, а также проведена оценка её эффективности при краткосрочном прогнозировании притока воды в Шульбинское водохранилище.

сновная идея модели заключается в представлении водосбора как системы взаимосвязанных блоков, в каждом из которых происходит накопление, задержка и перераспределение воды между различными компонентами гидрологического цикла.

Модель включает три основных модуля:

1. Модуль снеготаяния — определяет процессы накопления и таяния снежного покрова в зависимости от температуры воздуха.
2. Модуль влагообмена в почве — описывает динамику влажности почвенного слоя и величину испарения.
3. Модуль подземного и поверхностного стока — моделирует взаимодействие верхнего и нижнего горизонтов грунтовых вод, а также формирование поверхностного и базисного стока.

Структура модели представлена на рисунке 3.10, она включает накопление и таяние снега, расчет почвенной влаги, учет подземных вод, расчет гидрографа стока [74].

Рисунок 3.10 – Структура модели HBV

HBV позволяет использовать ежедневные значения осадков, температуры воздуха и испарения для расчёта среднесуточного стока на выходе водосбора. Пространственная неоднородность учитывается через деление бассейна на суббассейны и высотные зоны.

Преимуществом модели является её относительная простота, адаптивность параметров и возможность калибровки даже при ограниченных данных наблюдений. Это делает её особенно применимой для условий Казахстана, где густота гидрометеорологической сети ограничена, особенно в горных районах.

Для моделирования среднесуточного стока необходимы следующие входные данные: а) средневзвешанные осадки, б) температуру воздуха и в) потенциальное испарение. Расходы воды на каждом водосборном участке являются выходными данными HBV. Формула (4) общего водного баланса описывается следующим образом [75]:

$$P-E-Q=d\,[SP+SM+UZ+LZ+lakes]/dt, \quad (4)$$

где P – осадки, E – испарение, Q- сток, SP- снежный покров, SM - влажность почвы, UZ - верхняя зона грунтовых вод, LZ - нижняя зона грунтовых вод, lakes – объем озера.

Для моделирования гидрографа стока рек Оба и Ульби использовались многолетние ряды наблюдений за основными метеорологическими и гидрологическими элементами, предоставленные РГП «Казгидромет». В состав исходных данных вошли:

- среднесуточные температуры воздуха (°C);
- суточные суммы осадков (мм);
- значения потенциального испарения (мм);
- среднесуточные расходы воды (м³/с) на гидрологических постах Шемонаиха (р. Оба) и Ульби-Перевалочная (р. Ульби).

Периоды наблюдений, охватываемые моделью, составили рек Оба – г. Шемонаиха и Ульби – с. Ульби-Перевалочная 1978…2018 гг Такая выборка обусловлена наличием наиболее полных и достоверных наблюдений, необходимых для корректной калибровки и верификации модели HBV.

Для корректного отражения климатических особенностей бассейнов были использованы данные ближайших метеостанций Лениногорск, Шемонаиха и Усть-Каменогорск. Средние высоты расположения станций составляют 547–560 м над уровнем моря, что соответствует нижнему и среднему поясам водосборов.

С целью оценки влияния термических условий на процессы таяния снега и ледников в модель также вводились данные о многолетней динамике температуры воздуха в весенний период (март–май), а также о количестве твердых осадков. Потенциальное испарение рассчитывалось по эмпирическому уравнению Н. Н. Иванова [76]:

$$E_0=0.0018(T+25)^2(100-r) \quad (5)$$

где T – среднемесячная температура, r – среднемесячная относительная влажность воздуха**.**

Таким образом, входной массив данных позволил описать основные климатические и гидрологические характеристики исследуемых бассейнов и обеспечить базу для последующего моделирования.

Для пространственного анализа водосборов рек Оба и Ульби использовались данные цифровой модели рельефа (ЦМР) формата SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с разрешением 30×30 м, полученные с официального сайта Геологической службы США.

Обработка пространственных данных проводилась с использованием программного обеспечения ArcGIS Desktop (модули *Spatial Analyst* и *Hydrology tools*). На основе ЦМР были выполнены:

- построение границ водосборных бассейнов и определение направления стока;
- анализ уклонов и экспозиции склонов;
- расчёт распределения площади бассейнов по высотным зонам;

- построение карт изолиний высот и водораздельных контуров;
- выделение зон аккумуляции снега и потенциального формирования паводков.

Кроме того, в модель были интегрированы данные по ледниковому покрову, полученные из базы GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space), что позволило учесть вклад талых вод в формирование весеннего стока.

Все пространственные данные были приведены к проекционной системе координат WGS_1984_UTM_Zone_44N. Это обеспечило корректное совмещение всех картографических слоев и возможность пространственного анализа в пределах единой географической системы.

Для обеспечения надёжности моделирования была проведена калибровка параметров модели HBV, заключающаяся в подборе оптимальных значений коэффициентов, обеспечивающих максимальное совпадение между наблюдёнными и смоделированными расходами воды. Калибрация модели HBV для рек Оба – г. Шемонаиха и Ульби – с. Ульби-Перевалочная производилась за период 1978…2018 гг. Были выбраны годы с наилучшими результатами из ряда результатов. В работе [77] приведено описание этапов калибрования модели и подобранные параметры.

Процесс калибровки включал:

- анализ многолетних временных рядов стока;
- установление начальных значений параметров модели;
- последовательный подбор коэффициентов снеготаяния, инфильтрации и испарения;
- оценку чувствительности модели к изменениям входных данных;
- выбор периодов с наилучшим соответствием фактических и смоделированных данных.

Калибровка проводилась на основе наблюдений за выбранные годы (1978–2018 гг.) с учётом особенностей водного режима. Для рек Оба и Ульби были получены значения критерия эффективности в диапазоне 0,908–0,922, что свидетельствует о высокой точности воспроизведения гидрографов стока.

Дополнительно проводилась верификация модели на независимых временных интервалах, не использованных при калибровке, что позволило подтвердить её устойчивость и применимость для прогностических расчётов.

Калибровка модели для бассейна реки Оба

Для бассейна реки Оба калибровка модели проводилась с использованием данных гидрологического поста г. Шемонаиха за период 2002–2005 гг.. Площадь водосборной области составила около 8552 км², при высотном диапазоне от 297 до 2752 м. В качестве метеорологических входных данных использовались наблюдения со станций Лениногорск и Шемонаиха, средняя высота которых — около 560 м н.у.м.

По результатам калибровки установлено, что модель удовлетворительно воспроизводит динамику среднесуточных и среднемесячных расходов воды (рис.Е.1, Е.2). Коэффициент эффективности Нэша–Сатклиффа составил **0,908**, а коэффициент корреляции между фактическим и смоделированным стоком — $r = 0,947$, что свидетельствует о высокой достоверности расчётов.

Моделирование показало, что пик весеннего половодья приходится на конец апреля — начало мая, что согласуется с наблюдаемыми данными. Расхождения в отдельных пиках связаны с локальными аномалиями осадков и особенностями пространственного распределения температуры в пределах бассейна.

Ретроспективный анализ показал, что модель HBV достаточно точно отражает момент начала снеготаяния и последовательность формирования паводочной волны, однако несколько недооценивает максимальные расходы при экстремально тёплых веснах. Это объясняется упрощённой параметризацией процессов снеготаяния, заложенной в концептуальной структуре модели.

В целом результаты по бассейну р. Оба подтвердили, что модель способна надёжно воспроизводить как фазу половодья, так и последующие периоды спада стока, что делает её применимой для оперативных прогнозов и оценки реакции бассейна на изменения климатических условий.

Калибровка модели для бассейна реки Ульби. Для бассейна реки Ульби расчёты выполнялись по данным гидрологического поста с. Ульби-Перевалочная за период 1986–1990 гг.. Площадь водосборной территории составляет около 4931 км², высотный диапазон — от 335 до 2746 м н.у.м.. Входные метеорологические данные были получены со станций Лениногорск и Усть-Каменогорск, средняя высота которых — около 547 м.

Эффективность модели по критерию Нэша–Сатклиффа составила 0,922, что указывает на очень хорошее соответствие между наблюдаемыми и смоделированными расходами воды (рис.Е.3, Е.4). Коэффициент корреляции достиг $r = 0,963$, а это говорит о тесной связи между фактическими и расчётными данными.

Модель корректно воспроизводила сезонные колебания стока, включая пики весеннего половодья и периоды дождевых паводков в летне-осенний сезон. Полученные результаты подтвердили, что применённые параметры адекватно описывают процессы накопления влаги в снежном покрове и её последующего таяния, а также динамику почвенной влаги и подземных вод.

Следует отметить, что на отдельных временных участках наблюдались отклонения моделируемых расходов от фактических данных, преимущественно в периоды летних дождевых паводков. Это объясняется пространственной неоднородностью осадков и ограниченностью данных о фактическом испарении.

Тем не менее, результаты по реке Ульби подтвердили высокую точность и устойчивость работы модели HBV, что позволяет рекомендовать её для оперативных прогнозов и анализа сценариев при изменении климатических условий.

Оценка эффективности модели проводилась по трём основным критериям:

1. Критерий Нэша–Сатклиффа (NSE) — характеризует степень совпадения динамики модельных и наблюдаемых расходов воды;

2. Коэффициент корреляции (r) — отражает тесноту связи между наблюдаемыми и моделируемыми значениями;
3. Оправдываемость прогнозов (P) — показывает долю успешных прогнозов в процентах от общего числа расчётов.

Результаты оценки приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Оценка эффективности модели HBV

Показатель	Река Оба	Река Ульби
NSE	0,908	0,922
Коэффициент корреляции (r)	0,947	0,963
Средняя оправдываемость прогнозов (1 сутки)	81 %	81 %
Средняя оправдываемость прогнозов (3 суток)	80 %	80 %
Средняя оправдываемость прогнозов (7 суток)	77 %	77 %

Таким образом, полученные результаты демонстрируют, что модель HBV обладает высокой прогностической способностью при краткосрочных прогнозах стока на срок до 3 суток. При увеличении заблаговременности до 7 суток точность прогнозов несколько снижается, что объясняется возрастанием неопределённости метеорологических прогнозов.

Анализ краткосрочного прогноза стока. Краткосрочные прогнозы были выполнены с заблаговременностью 1 (рис.3.1), 3 (табл. Е.1) и 7 (табл. Е.2) суток для периода активного половодья (март–апрель 2018 г.). Для каждого прогноза использовались фактические данные температуры и осадков до даты выпуска прогноза, а также прогнозные значения этих величин на заданный период.

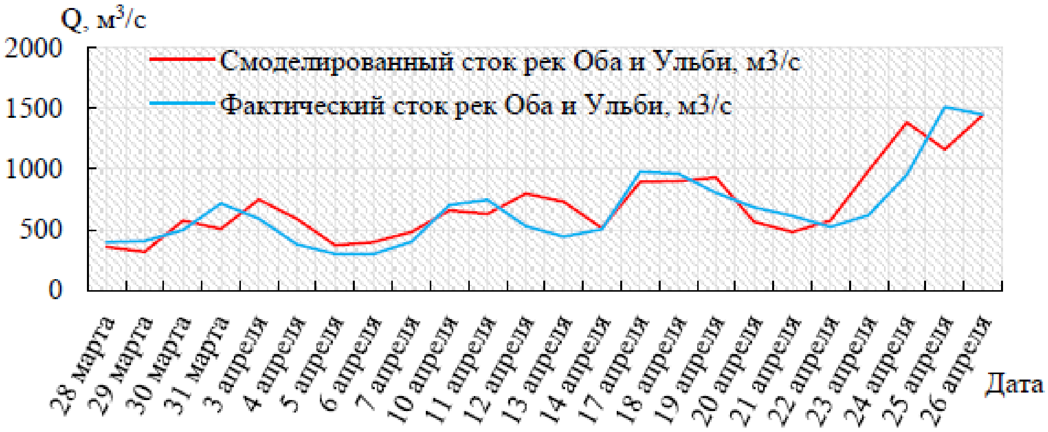


Рисунок 3.11 - Результаты моделирования притока в Шульбинское водохранилище (суммарный сток р.Ульби – с.Ульби-Перевалочная и р.Оба – г.Шемонаиха) с заблаговременностью 1 сутки.

Результаты показали, что модель эффективно воспроизводит динамику объёма притока в Шульбинское водохранилище. Средняя оправдываемость прогнозов на один день составила 81 %, на три дня — 80 %, а на семь дней — 77 %.

Анализ показал, что при кратких сроках прогноза (1–3 суток) погрешности в основном связаны с неравномерностью распределения осадков и локальными температурными колебаниями. При увеличении горизонта прогноза (7 суток) ошибки растут, в первую очередь из-за неопределённости метеорологических прогнозов и усреднения входных параметров.

Тем не менее, даже при заблаговременности до недели модель демонстрирует устойчивые результаты, что подтверждает её применимость для оперативного использования в региональной гидрометеорологической практике.

Полученные результаты моделирования подтверждают высокую эффективность применения модели HBV для бассейнов рек Оба и Ульби. При этом следует отметить, что адаптация и использование модели в условиях изменения климата требуют учёта ряда факторов, влияющих на водный баланс региона.

Во-первых, согласно наблюдениям Казгидромета и международных исследований, в Восточном Казахстане наблюдается устойчивая тенденция к повышению температуры воздуха, особенно в весенний период. Это приводит к более раннему началу снеготаяния и сокращению продолжительности половодья. Такие изменения существенно влияют на параметры модели, в частности на коэффициенты снеготаяния и инфильтрации.

Во-вторых, пространственное и временное перераспределение осадков в условиях потепления климата может изменять структуру формирования стока: усиливается доля дождевого питания и снижается вклад талых вод. Это требует адаптации параметров модели для корректного воспроизведения новых условий водного режима.

В-третьих, сокращение ледникового покрова в верховьях бассейнов, зафиксированное спутниковыми наблюдениями (по данным GLIMS), также приводит к уменьшению запасов твёрдой влаги и изменению межгодовой изменчивости стока.

Таким образом, дальнейшее использование модели HBV в регионе Восточного Казахстана должно предусматривать сценарное моделирование с учётом климатических проекций (например, RCP4.5 и RCP8.5), что позволит оценить возможные изменения гидрографа стока и риски для водохозяйственных систем в будущем.

Глава 5. Оценка и анализ влияния изменения климата на сток рек Оба и Ульби в XXI веке

5.1 Климатические модели

При оценке и анализе влияния изменения климата на сток рек Оба и Ульби автором использовались откалиброванная гидрологическая модель SWIM и климатические проекции на основе моделей системы Земля (МСЗ) CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 - проект взаимного сравнения связанных моделей, этап 5) предложенные проектом ISIMIP (The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project - Проект межсекторального сравнения моделей воздействия) [65]. CMIP5 - это совместная структура, созданная в 1995 году Рабочей группой по совместному моделированию (WGCM) Всемирной программы исследований климата (WCRP), которая предназначена для улучшения знаний об изменении климата. Она разрабатывается поэтапно для улучшения компьютерных моделей климата Земли, в которых различные части (например, атмосфера, океаны, суша, лед) связаны вместе и взаимодействуют при моделировании. CMIP также поддерживает национальные и международные оценки изменения климата. В рамках CMIP проводится Проект взаимного сравнения атмосферных моделей (AMIP) для глобальных совместных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦ).

Целью проекта ISIMIP является подготовка протоколов моделирования и входных данных для мультимодельной симуляциии анализа воздействия климата в различных секторах экономики, чтобы получить общую картину рисков изменения климата в региональном и глобальном масштабах при различных уровнях глобального потепления. В ISIMIP используются мультимодельные ансамбли, что позволяет количественно оценить неопределенности от разных источников на различных этапах моделирования. Водный сектор является одним из самых важных в ISIMIP, и подразделяется на два подсектора: региональный и глобальный.

Для данного исследования были выбраны пять симуляций климата моделями системы Земля CMIP5, принятыми для проекта ISIMIP: GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM и NorESM1-M. (см. табл. 4.1).

Для сценариев ISIMIP использовался статистический метод масштабирования до $0{,}5^0$ (downscaling) и коррекция смещения (bias correction), обеспечивающие сохранение смоделированных тенденций потепления.

Таблица 4.1 - Список глобальных моделей системы Земля: CMIP5, использованных в исследовании

№	Модель	Центр моделирования	Оригинальное разрешение (Lon × Lat)
1	GFDL-ESM2M	Лаборатория геофизической гидродинамики, США	$2.5^0 \times 2.0^0$
2	HadGEM2-ES	Метеорологический центр Хэдли, Великобритания	$1.87^0 \times 1.25^0$
3	IPSL-CM5A-LR	Институт Пьера Симона Лапласа, Франция	$1.89^0 \times 3.75^0$
4	MIROC-ESM-CHEM	Институт атмосферы и океана, Токийский университет, Япония	$2.8^0 \times 2.8^0$
5	NorESM1-M	Центр климатических исследований Бьеркнеса, Норвежский метеорологический институт, Норвегия	$2.5^0 \times 1.9^0$

Сначала выходные климатические данные МСЗ были билинейно интерполированы в полуградусную сетку, а затем скорректированы на смещение, используя данные реанализа WATCH Era 40 в качестве стандарта. WATCH ERA-40 - это повторный анализ метеорологических наблюдений за период с сентября 1957 года по август 2002 года, который был подготовлен Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды. Он представляет собой обновленный анализ метеорологических данных и позволяет более точно оценить состояние атмосферы и изменения климата за период с 1957 по 2002 годы. Более подробную информацию о методе коррекции смещения можно найти в работе [66].

Автором применены данные климатических проекций МСЗ для двух сценариев глобального потепления: RCP4.5 (средний сценарий) и RCP 8.5 (жесткий сценарий). RCP4.5 это сценарий умеренных выбросов парниковых газов, который соответствует повышению глобальной температуры от 1,7 до 3,2 °C к 2100 году, тогда как RCP8.5 - это экстремальный сценарий высокого уровня выбросов парниковых газов, соответствующий глобальному потеплению от 3,2 до 8 °C к концу века [67]. Все проекции будущего климата использовались в виде непрерывных ежедневных наборов данных климатических параметров за период 1950-2100 гг.

5.1.1. Моделирование исторической динамики стока с помощью SWIM с использованием входных климатических данных моделей системы Земля

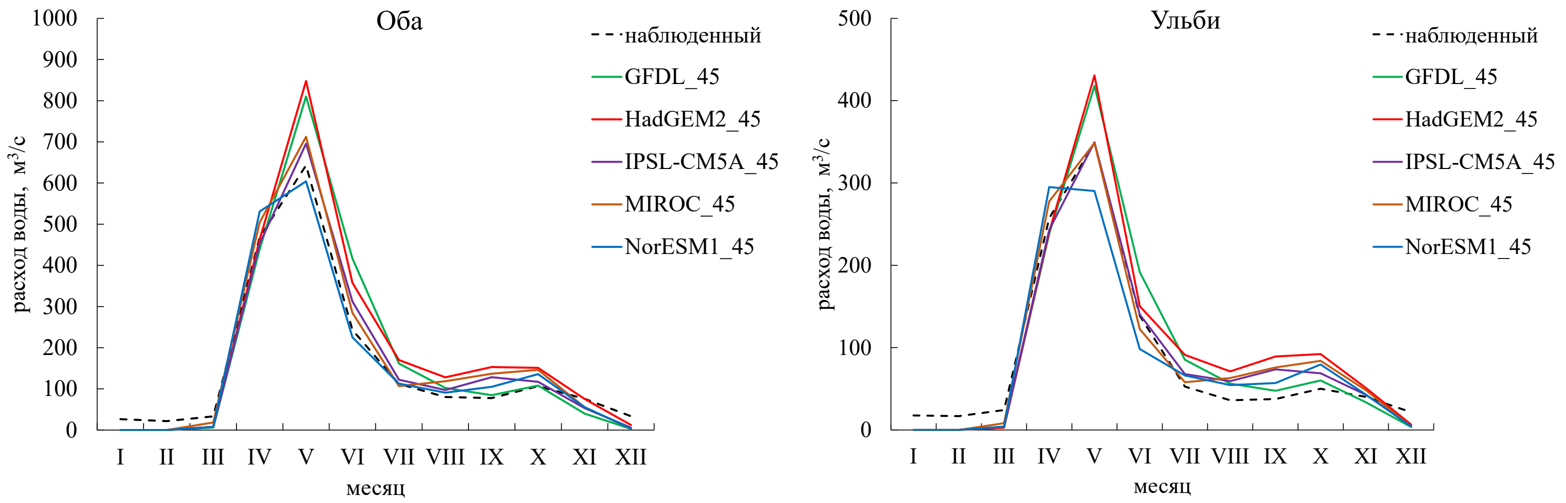
После выполнения калибровки и валидации модели SWIM с использованием наблюдательных климатических данных проекта WATCH, был проведён дополнительный эксперимент, направленный на оценку адекватности климатических данных, полученных из пяти моделей системы Земли (МСЗ). Для этого модель SWIM была повторно запущена за базовый период 1981–2010 гг., а полученные значения стока были сопоставлены с наблюдаемыми данными для рек Оба и Ульби.

На рисунке 4.1 представлены сравнительные графики долгосрочной среднемесячной динамики стока, рассчитанной с использованием климатических данных различных МСЗ, и фактических наблюдений. В целом, результаты моделирования демонстрируют хорошее согласование общей формы гидрографа с наблюдаемой динамикой, что подтверждает способность модели SWIM адекватно воспроизводить сезонные закономерности формирования стока в исследуемых бассейнах. Основные фазы гидрографа — подъём весеннего паводка, летняя стабилизация и осенне-зимнее снижение водности — отражены корректно для всех рассмотренных моделей. Однако при более детальном анализе выявлены систематические отклонения, зависящие от используемых климатических данных.

Переоценка пикового стока (HadGEM2-ES и GFDL-ESM2M. Для обеих рек отмечено завышение максимальных расходов воды в апреле–мае при использовании данных климатических моделей HadGEM2-ES и GFDL-ESM2M. Эти МСЗ характеризуются тенденцией к переоценке количества осадков в холодный период и более ранним наступлением положительных температур, что приводит к ускоренному снеготаянию и, как следствие, завышению весенних пиков. Такое поведение модели SWIM указывает на чувствительность параметров снеготаяния к входным климатическим данным. В данном случае, несмотря на адекватное воспроизведение сезонности, модельная реакция на весеннее потепление была более интенсивной, чем наблюдалось в реальности.

Недооценка пикового стока (NorESM1-M). Для бассейна реки Ульби наблюдается недооценка весеннего максимума при использовании данных климатической модели NorESM1-M. Этот результат может быть связан с занижением количества твёрдых осадков в исходных климатических данных и, как следствие, меньшим объёмом запасённой влаги в снежном покрове к моменту начала снеготаяния. Вследствие этого гидрограф, рассчитанный на основе NorESM1-M, характеризуется более плавным весенним пиком и сдвигом максимума стока на более поздний срок.

а)



б)

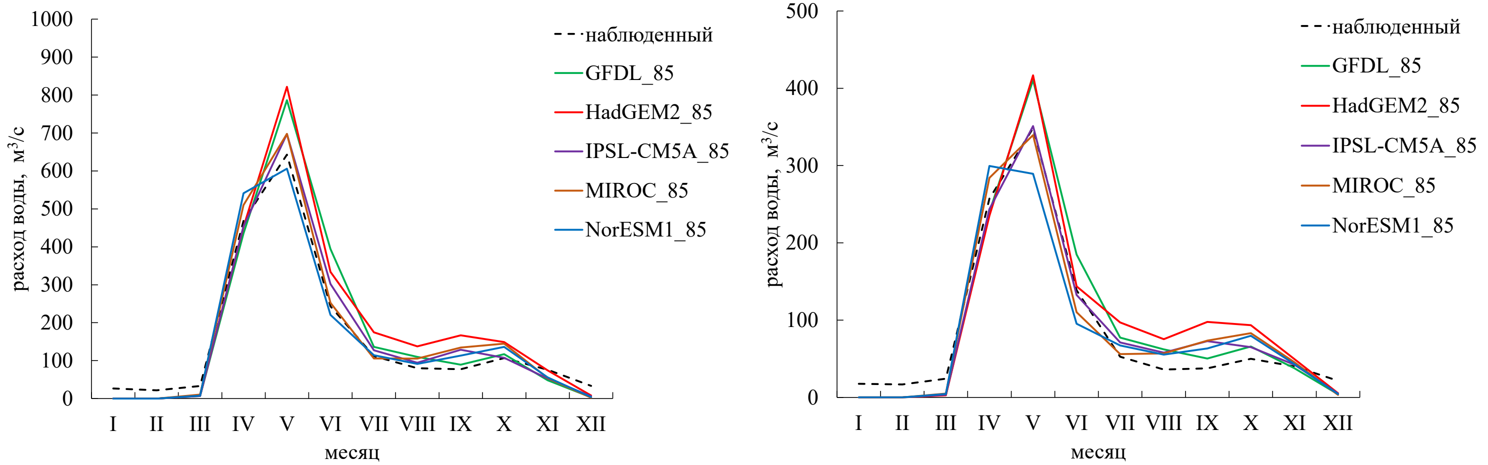


Рисунок 4.1 - Долгосрочная среднемесячная динамика наблюдаемого речного стока в сравнении с моделируемым стоком при (а) стабилизационном сценарии RCP4.5 и (б) сценарии сравнительно высоких выбросов парниковых газов, RCP8.5, рассчитанных на основе пяти моделей МСЗ за базовый период 1981-2010 гг. для двух исследуемых бассейнов

Неопределённость осеннего стока. Кроме весеннего периода, наибольшие расхождения между наблюдаемыми и моделируемыми значениями отмечаются в осенние месяцы (сентябрь–октябрь), особенно для бассейна реки Оба. Для обеих рек в этот период наблюдается увеличение разброса модельных данных, что указывает на возрастающую неопределённость климатических входных параметров (в частности, распределения осадков и испарения в конце вегетационного сезона).

На рисунке приведены два варианта расчётов — для сценария стабилизации выбросов (RCP4.5) и сценария повышенных выбросов парниковых газов (RCP8.5). В обоих случаях наблюдается аналогичная структура сезонной изменчивости, однако при сценарии RCP8.5 отмечается более ранний подъём весеннего стока и более выраженные пики в апреле, что согласуется с тенденцией к потеплению и сокращению продолжительности снежного периода.

5.1.2 Прогнозируемые изменения климата в бассейнах рек Оба и Ульби

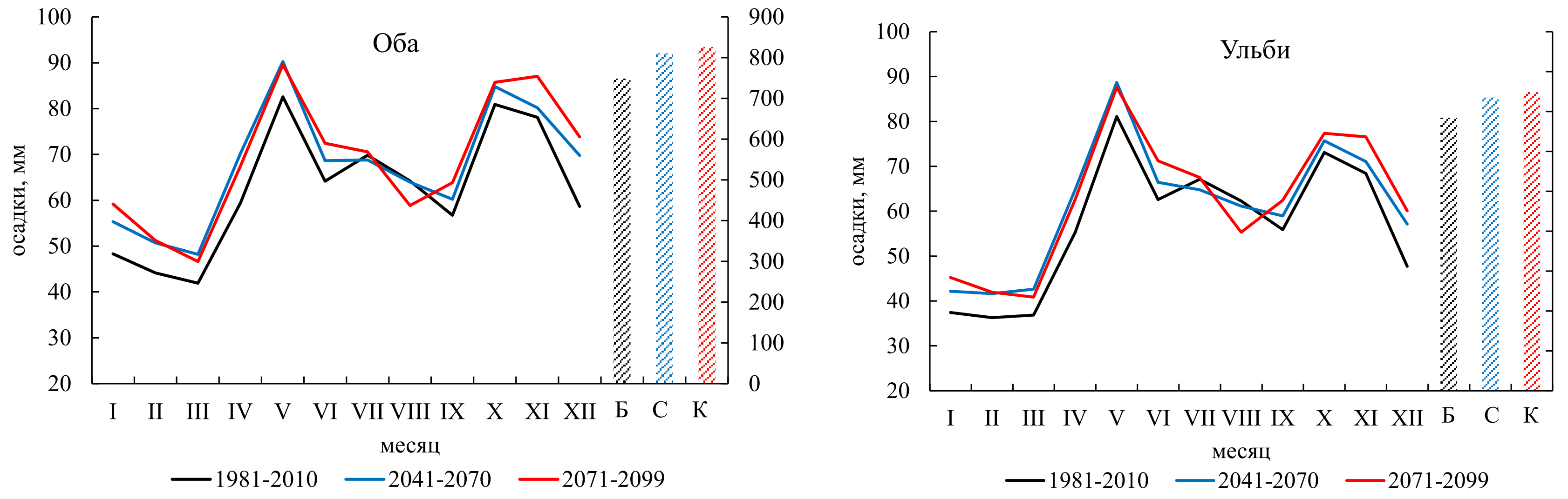
В данном разделе автором дана оценка изменения климата в бассейнах рек Оба и Ульби на основе данных моделей МСЗ. На рисунках 4.2 и 4.3 показана долгосрочная среднемесячная динамика осадков и температуры для базового периода (1981-2010), середины столетия (2041-2070) и конца столетия (2071-2099) согласно сценариям изменения климата RCP4.5 и RCP8.5 для двух исследуемых бассейнов. Согласно результатам моделей МСЗ, ожидается увеличение среднегодового количества осадков в обоих водосборных бассейнах (см. таблица 4.2).

Таблица 4.2 - Среднегодовые изменения осадков и температуры в середине и конце века для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 по сравнению с базовым периодом

Период	RCP4.5		RCP8.5	
	Оба	Ульби	Оба	Ульби
Среднегодовое изменение осадков, в % (С- Б)	8.3%	7.5%	10.6%	12.3%
Среднегодовое изменение осадков, в % (К - Б)	10%	9.5%	13%	14%
Повышение температуры воздуха в градусах С (С - Б)	2.9	2.9	3.8	3.7
Повышение температуры воздуха в градусах С (К - Б)	3.6	3.5	6.2	6.1

*Б – базовый период (1981-2010)
С – середина века (1941-2070)
К – конец века (2071-2099)

a)



b)

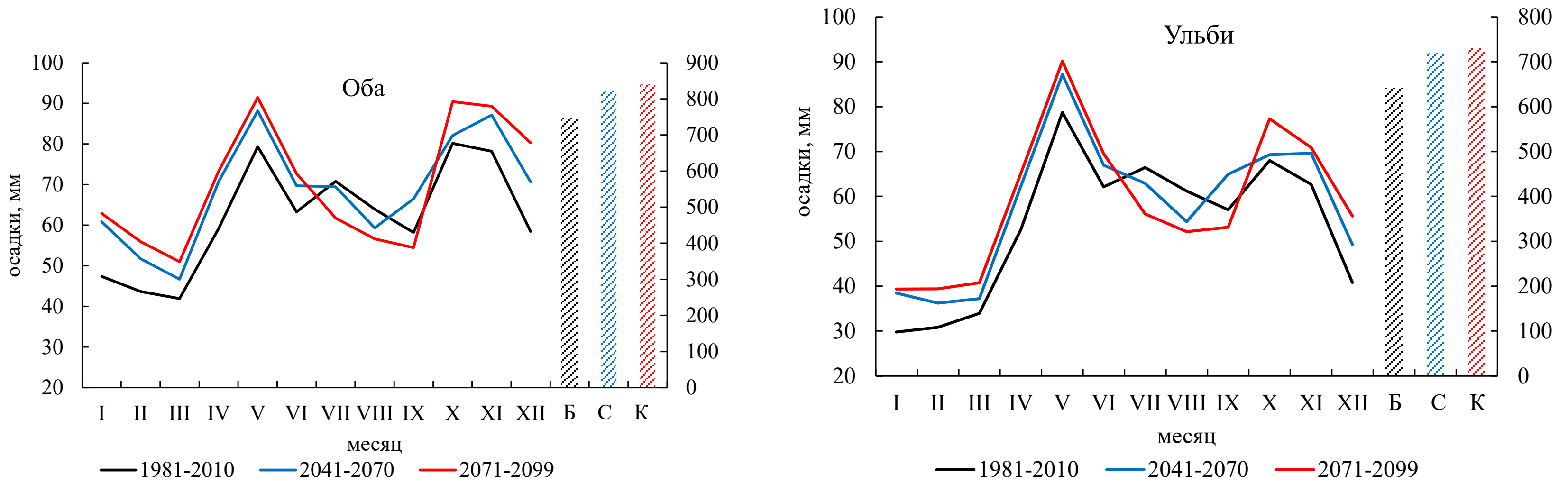
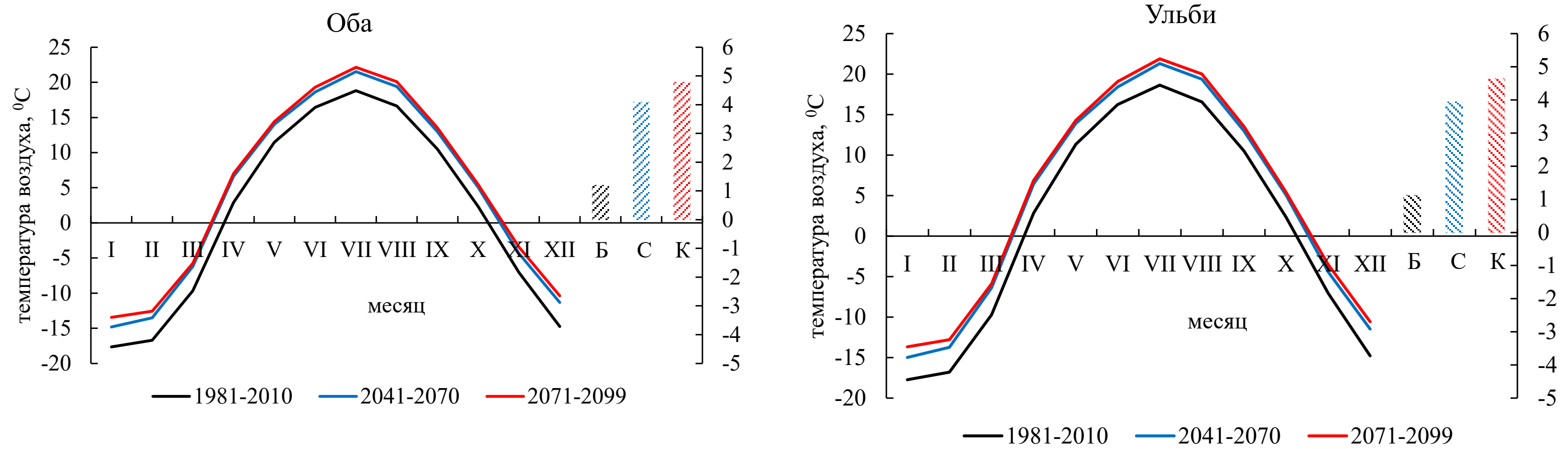


Рисунок 4.2 - Долгосрочные средние (слева) и годовые (столбцы, справа) осадки для базового периода (Б), середины века (С) и конца века (К), в соответствии со сценариями RCP4.5 (a) и RCP8.5 (b) для бассейнов Оба и Ульби

a)



b)

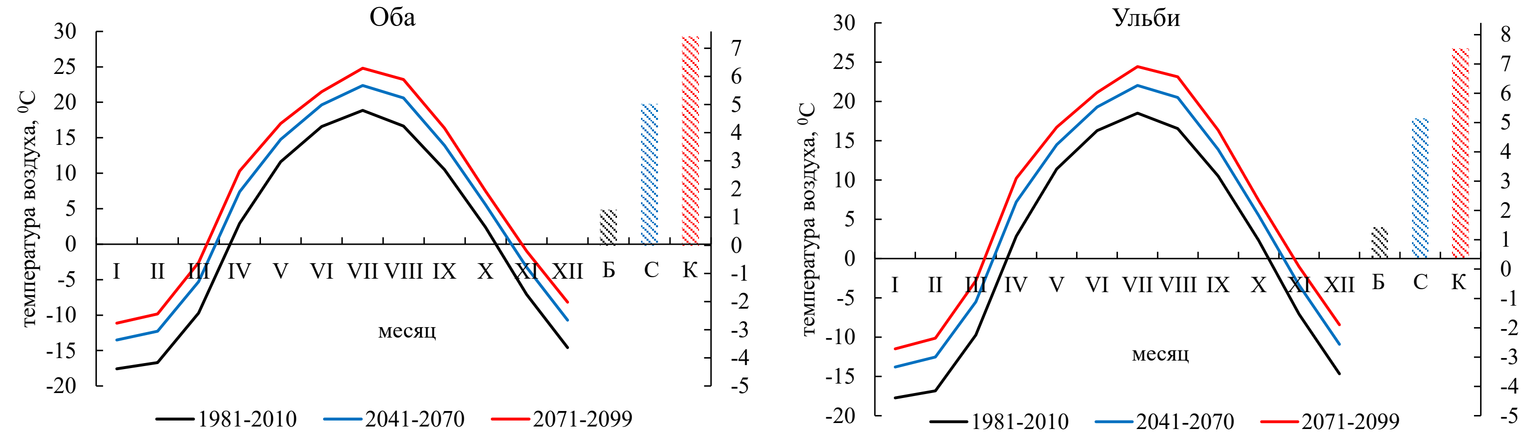


Рисунок 4.3 - Динамика долгосрочных среднемесячных (слева) и годовых (столбцы, справа) температур для базового периода (Б), середины века (С) и конца века (К), в соответствии с модельными прогнозами моделей МСЗ в сценариях RCP4.5 (a) и RCP8.5 (b) для бассейнов Оба и Ульби

Однако сезонная динамика (рис. 4.2) показывает снижение в течение нескольких месяцев, что одинаково для обоих бассейнов, а именно: умеренное снижение в августе в сценарии RCP4.5 в конце века, небольшое снижение в августе в сценарии RCP8.5 в середине века и более сильное снижение в июле - сентябре в сценарии RCP8.5 в конце века.

Согласно рис. 4.3, температура воздуха будет повышаться в обоих бассейнах в течение всего года, по обоим сценариям и в течение обоих будущих временных срезов с более высоким увеличением при жестком сценарии по сравнению с RCP4.5 и в конце века по сравнению с серединой века. Самое сильное повышение температуры прогнозируется для обоих бассейнов в течение года (около 6^0C) в рамках RCP8.5 в конце века.

5.2 Прогнозируемые изменения речного стока рек Оба и Ульби в условиях глобального потепления

Посла калибрации модели SWIM и анализа входных климатических данных моделей МСЗ было произведено моделирование стока рек Оба и Ульби на перспективу на основе среднего и жесткого сценариев изменения климата (RCP4.5 и 8.5) с целью анализа воздействия прогнозируемых изменений климата на наличие водных ресурсов в исследуемых бассейнах. На рисунках 4.4 и 4.5 показаны мультимодельные средние (от пяти ведущих моделей МСЗ) и модельные разбросы (от минимальных до максимальных значений) долгосрочного среднего сезонного стока на выходе из обоих бассейнов в двух будущих периодах: в середине столетия (2041-2070) и в конце века (1971-2099) для двух сценариев глобального потепления: RCP4.5 (умеренный) и RCP8.5 (высокий) в сравнении с модельными прогонами за базовый период. В целом, было обнаружено небольшое или умеренное увеличение среднегодового стока в водосборных бассейнах Оба и Ульби при обоих сценариях потепления и в обоих будущих периодах по сравнению с базовым периодом [68]. Таблица 4.3 показывает, что среднегодовой сток в реке Оба увеличится на 5,7-8,1% в сценариях RCP4.5 и RCP8.5. Для бассейна реки Ульби прогнозы показывают небольшое увеличение в середине столетия по обоим сценариям и в конце века по сценарию RCP4.5 (от 2 до 4 %), и незначительное снижение на 1 % в конце века по сценарию RCP8.5.

Таблица 4.3 - Долгосрочный среднегодовой сток в базовом и двух будущих периодах и процентное изменение между будущими и базовым периодами для сценариев RCP4.5 и RCP8.5

Период	RCP4.5		RCP8.5	
	Оба	Ульби	Оба	Ульби
Долгосрочный среднегодовой сток в базовый период (1981-2010 гг.), $м^3/с$	175	92	173	93
Долгосрочный среднегодовой сток в период середины века (2041-2070 гг.), $м^3/с$	185	95	187	95
Долгосрочный среднегодовой сток в период конца века (2071-2099 гг.), $м^3/с$	188	96	186	92
Разница между серединой века и базовым периодами, %	5.7%	3%	8.1%	2%
Разница между концом века и базовым периодами, %	7.4%	4%	7.5%	-1%

Таким образом, различия между базовым и будущим периодами очевидны для реки Оба при обоих сценариях, где в настоящее время сток увеличивается, тогда как для бассейна реки Ульби различия довольно незначительны.

На рисунках 4.4 и 4.5 показано сравнение долгосрочной средней сезонной динамики стока в будущие периоды с динамикой в базовый период. Как видно, пик стока ожидается примерно на месяц раньше, смещаясь с мая на апрель, поскольку средняя температура на водосборах станет положительной раньше в связи с потеплением климата. Кроме того, период пикового стока растянут во времени. Согласно прогнозам, при сценарии RCP4.5 в обоих бассейнах можно ожидать снижения стока в мае-августе, а при сценарии RCP8.5 эта тенденция снижения стока распространяется на сентябрь. Также наблюдается небольшое увеличение стока с октября по декабрь в сценарии RCP8.5 в обоих временных срезах, а в конце века в сценарии RCP4.5.

5.3 Оценка возможных изменений притока речных вод в Шульбинское водохранилище

Результаты моделирования возможных климатических сценариев указывают на тенденцию к изменению как величины, так и сезонного распределения стока рек Оба и Ульби, которые формируют основной приток в Шульбинское водохранилище. По оценкам, выполненным с использованием модели SWIM и климатических данных для сценариев RCP4.5 и RCP8.5, ожидается незначительное увеличение среднегодового стока. Для бассейна реки Оба прогнозируется рост в пределах 6–8 %, а для бассейна реки Ульби – от снижения на 1 % до увеличения на 4 % в зависимости от сценария и временного горизонта моделирования.

Несмотря на умеренные изменения годовых величин, наиболее выраженными оказываются сдвиги сезонного распределения стока. В обоих сценариях наблюдается смещение весеннего пика на более ранний срок — с мая на апрель, что обусловлено повышением среднесезонных температур воздуха и, как следствие, ускоренным снеготаянием.Такая тенденция согласуется с результатами аналогичных исследований, выполненных для других бассейнов Казахстана и Центральной Азии [16, 18, 24], где также выявлены более ранние фазы половодья и изменения структуры сезонного стока.

По мнению автора, прогнозируемые изменения связаны прежде всего с: а) повышением температуры воздуха в весенне-зимний период, что приводит к раннему таянию снега и сокращению продолжительности снежного сезона; б) увеличением количества осадков в позднеосенний период, что влияет на перераспределение влаги в зимние месяцы и повышает долю дождевых осадков в структуре питания рек.

Вместе с тем, для обоих исследуемых бассейнов по сценарию RCP8.5 выявлено снижение водности в летние месяцы (июнь–август) в обоих временных срезах, а также аналогичная тенденция проявляется к концу XXI века и для сценария RCP4.5. Это объясняется ростом температуры воздуха и испаряемости, а также сокращением запасов снеговых и ледниковых вод, которые традиционно поддерживали сток в летний период.

Суммарный вклад рек Оба и Ульби в формирование притока в Шульбинское водохранилище оценивается примерно в 65 % от общего объёма поступающих вод, что делает их гидрологическое поведение ключевым фактором при управлении режимом водохранилища. Следовательно, даже относительно небольшие изменения годового и сезонного стока могут оказать существенное влияние на водохозяйственный баланс каскада и эффективность работы гидроэнергетических объектов.

Таким образом, результаты сценарного анализа позволяют сделать вывод о том, что в условиях изменения климата ожидаются более ранние паводки, незначительное увеличение среднегодового стока и снижение водности в летний период, что требует адаптивного подхода к управлению водными ресурсами Шульбинского водохранилища и всей Иртышской водной системы.

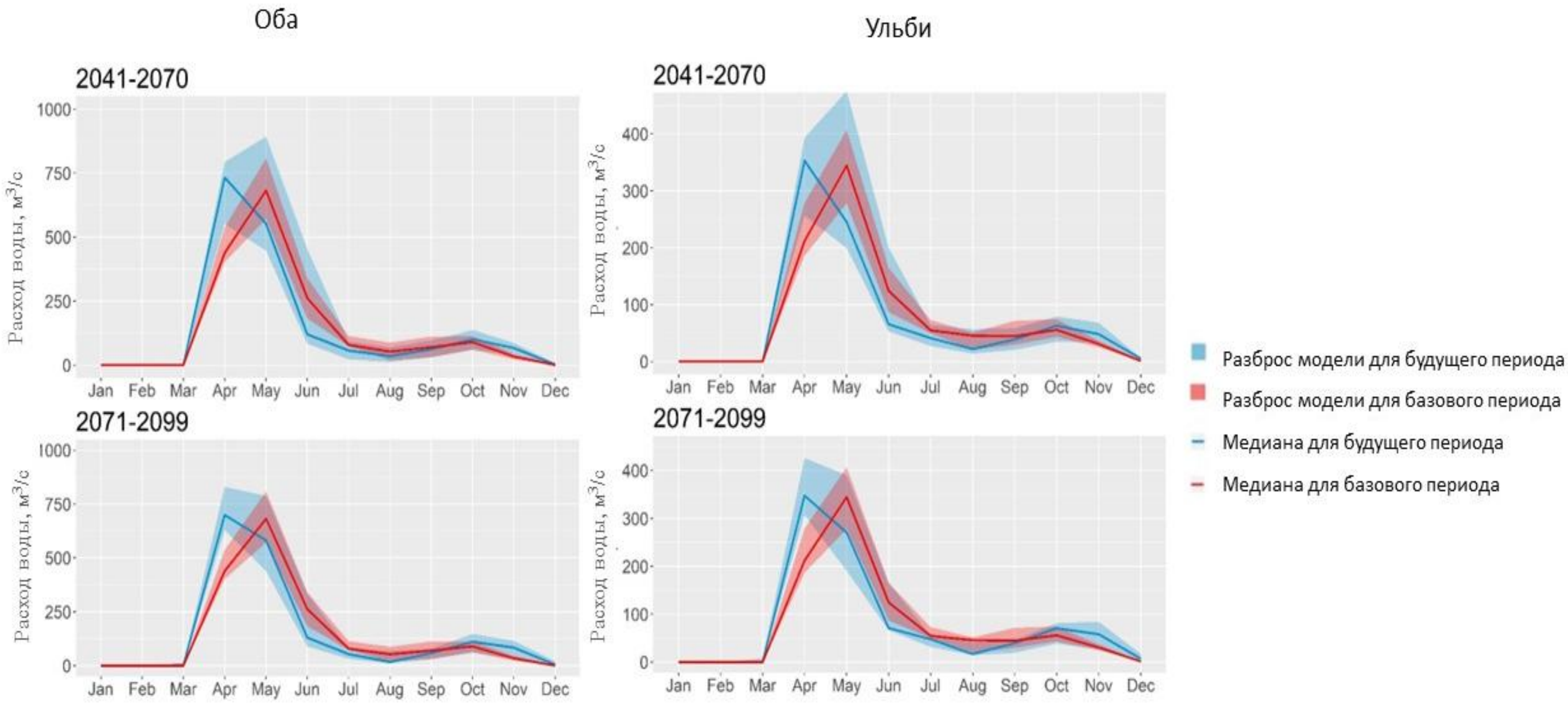


Рисунок 4.4 - Сравнение долгосрочной средней сезонной динамики стока в середине века и в конце века с базовым периодом (все – смоделировано с помощью модели SWIM, основанной на климатических прогнозах по сценарию RCP 4.5) для двух исследуемых бассейнов

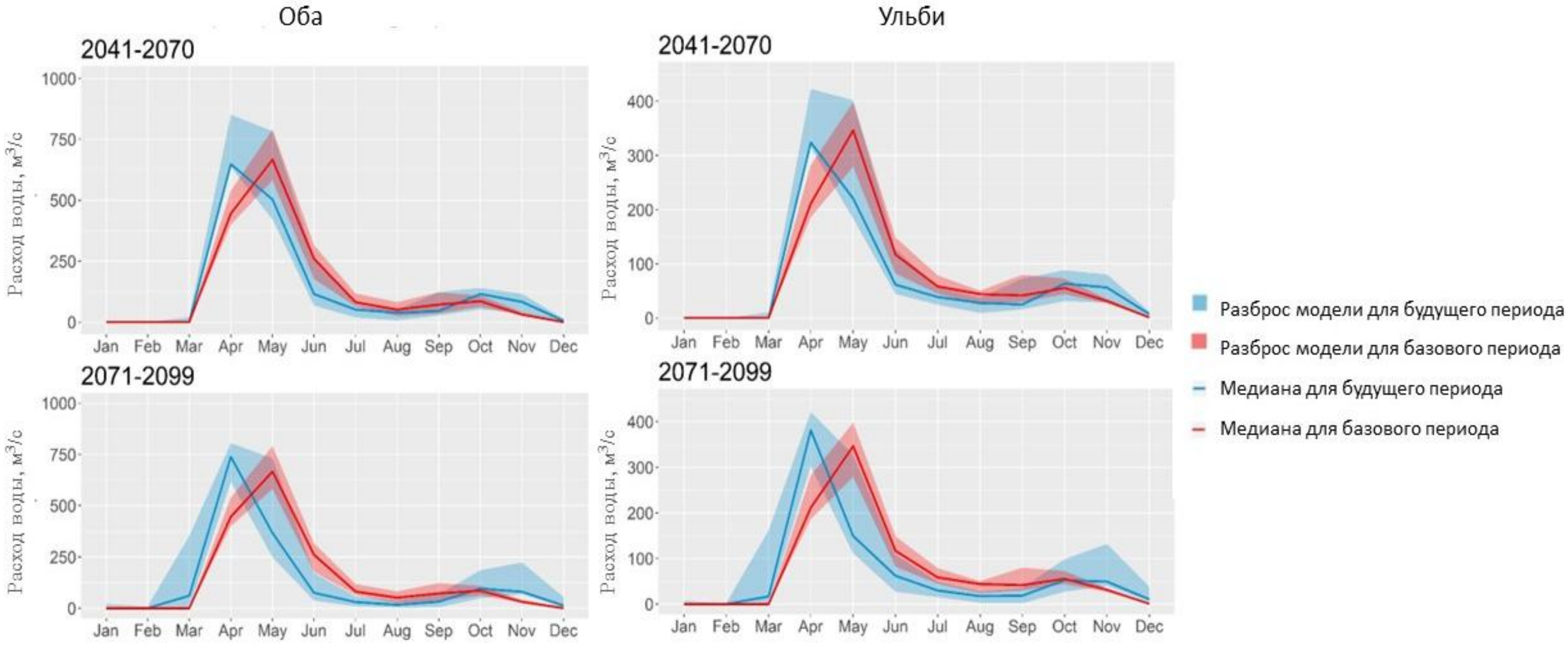


Рисунок 4.5 - Сравнение долгосрочной средней сезонной динамики стока в середине века и в конце века с базовым периодом (все – смоделировано с помощью модели SWIM, основанной на климатических прогнозах по сценарию RCP 8.5) для двух исследуемых бассейнов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведена оценка и моделирование гидрографа стока рек Оба и Ульби в условиях изменения климата. Согласно результатам моделей МСЗ, ожидается увеличение среднегодового количества осадков в обоих водосборных бассейнах. Однако сезонная динамика показывает снижение в течение нескольких месяцев, что одинаково для обоих бассейнов, а именно: умеренное снижение в августе в сценарии RCP4.5 в конце века, небольшое снижение в августе в сценарии RCP8.5 в середине века и более сильное снижение в июле — сентябре в сценарии RCP8.5 в конце века. Температура воздуха будет повышаться в обоих бассейнах в течение всего года, по обоим сценариям и в течение обоих будущих временных срезов с более высоким увеличением при жестком сценарии по сравнению с RCP4.5 и в конце века по сравнению с серединой века. Самое сильное повышение температуры прогнозируется для обоих бассейнов в течение года (около 6^0C) согласно RCP8.5 в конце века. В ходе исследования с применением климатических моделей и гидрологической модели SWIM было обнаружено небольшое или умеренное увеличение среднегодового стока в водосборных бассейнах Оба и Ульби при обоих сценариях потепления и в обоих будущих периодах по сравнению с базовым периодом. Среднегодовой сток в реке Оба увеличится на 5,7-8,1% в сценариях RCP4.5 и RCP8.5. Для бассейна реки Ульби прогнозы показывают небольшое увеличение в середине столетия по обоим сценариям и в конце века по сценарию RCP4.5 (от 2 до 4 %), и незначительное снижение на 1 % в конце века по сценарию RCP8.5.

Результаты оценки воздействия климата на речной сток исследуемых бассейнов согласуются с аналогичными результатами, полученными в литературе в отношении общих тенденций в Центральной Азии. Четкая тенденция смещения пиков речного стока на один месяц раньше, прогнозируемая автором, была обнаружена и в других предыдущих исследованиях [69, 70]. Кроме того, смещение пиков стока в результате повышения температуры и более интенсивного снеготаяния было обнаружено ранее для другого притока Иртыша - реки Бухтырма [18].

Вполне возможно, что полученные результаты, в случае их осуществления, окажут влияние на режим Шульбинского водохранилища. Смещение весеннего максимума требует пересмотра режима регулирования стока в регионе и разработки надежных правил управления водными ресурсами. Необходимо повышение качества и обоснованности гидрологических прогнозов, а также разработка моделей и научно обоснованных рекомендаций, позволяющих оценить новые ситуации, которые могут возникнуть при формировании и использовании водных ресурсов в будущем.

Кроме того, повышение температуры может привести к снижению влажности почвы и уменьшению биоразнообразия, что потребует перехода на более засухоустойчивые сорта и культуры, лучше приспособленные к климатическим изменениям. Дефицит осадков в летние месяцы может повлиять на промышленность, энергетику и транспорт региона. Дефицит воды и засухи могут оказать сильное влияние на природные ресурсы в целом из-за негативных побочных последствий для биоразнообразия, качества воды, роста риска лесных пожаров и потери плодородия почвы [71].

Результаты этой работы могут быть использованы для восполнения пробелов в данных и в качестве дополнительного источника гидрологических данных по региону с редкой сетью наблюдений. Откалиброванная и проверенная модель SWIM может также применяться для гидрологических прогнозов в ближайшие десятилетия. Результаты успешного применения модели SWIM для бассейнов рек Оба и Ульби дают возможность продолжить работу по моделированию речного стока в этих бассейнах, а также провести оценку воздействия изменения климата и землепользования. Кроме того, результаты данной работы могут быть применены при планировании водохозяйственной деятельности в исследуемом районе, в том числе при планировании попусков воды из Шульбинского водохранилища для более эффективного использования водных ресурсов региона с учетом потребностей сельского хозяйства и Шульбинской ГЭС. Они также могут быть использованы для оценки речного стока изучаемых речных бассейнов, разработки природоохранных мероприятий и подготовки межправительственных соглашений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Arrhenius S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground // Philosophical Magazine and Journal of Science Series 5. – 1896. – Vol. 41 – P. 237-276.

2 Callendar G.S. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1938. - Issue 275, Vol. 64 – P. 223-240.

3 Houghton J.T., Ding Y., Grigas D.J. et. al. Climate Change, 2001. The Scientific Basis. Contribution of working group I to the Third assessment report of the intergovernmental panel on Climate Change. Cambridge // Cambridge University Press – 2001. – № 944.

4 Salnikov V., Turulina G., Polyakova S., Petrova Y., Skakova A., Climate change in Kazakhstan during the past 70 years // Quaternary International. - 2014. – Vol. 358.- P. 77–82. http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2014.09.008

5 Долгих С., Смирнова Ю., Кожахметов П., Каипов И. Оценка уязвимости, воздействия изменения климата и меры адаптации // Седьмое национальное сообщение и третий двухгодичный отчет Республики Казахстан для Рамочной конвенции ООН об изменении климата. - Астана, 2017. - 304 с.

6 Bellard C., Bertelsmeier C., Leadley P., Thuiller W., Courchamp F. Impacts of climate change on the future of biodiversity // Ecol Lett. – 2012. – Vol. 15 - P. 365–377. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x

7 Huang J., Ji M., Xie Y., Wang S., He Y., Ran J. Global semi-arid climate change over last 60 years // Climate Dynamics. – 2016. – Vol. 46(3). – P. 1131–1150. https://doi.org/10.1007/s00382-015-2636-8

8 Krysanova V., Wechsung F., Arnold J., Ragavan S., Williams J. (2000) SWIM (Soil and Water Integrated Model). User Manual. PIK Report Nr. 69: Potsdam, Germany.

9 Мальковский И. М. Водная безопасность Казахстана: проблемы и решения. Крупнейший в мире дефицит // Центральная Азия Мониторинг. – 2012. - 7 с.

10 Bissenbayeva S., Abuduwaili J., Shokparova D., Saparova A. Variation in runoff of the Arys river and Keles river watersheds (Kazakhstan), as influenced by climate variation and human activity // Sustainability. – 2019. – Vol. 11(17). – P. 4788 https://doi.org/10.3390/su11174788

11 Rakhimova M., Liu T., Bissenbayeva S., Mukanov Y., Gaforov K.Sh., Bekpergenova Z., Gulakhmadov A. Assessment of the Impacts of Climate Change and Human Activities on Runoff Using Climate Elasticity Method and General Circulation Model (GCM) in the Buqtyrma River Basin, Kazakhstan // Sustainability. – 2020. – Vol. 12(12). – P. 4968. DOI: 10.3390/su12124968.

12 Golubtsov V. V. Vulnerability Assessment of the Water Resources of Kazakhstan to Anthropogenic Climate Change and the Structure of Adaptation Measures // International Journal of Water Resources Development. – 1996. – Vol. 12(2). – P. 193–208. https://doi.org/10.1080/07900629650041957

13 Tursunova A., Medeu A., Alimkulov S., Saparova A., Baspakova G. Water resources of Kazakhstan in conditions of uncertainty // Journal of Water and Land Development. – 2022. - P. 138–149. https://doi.org/10.24425/jwld.2022.141565

14 Ибатуллин С.Р., Ясинский В.А., Мироненков А.П. Влияние изменения климата на водные ресурсы в Центральной Азии // Сводный отчет. Евразийский банк развития - Алматы, 2009. - 44 с. http://www.cawater-info.net/library/rus/eabr_1.pdf

15 Kakabayev, A.; Yessenzholov, B.; Khussainov, A.; Rodrigo-Ilarri, J.; Rodrigo-Clavero, M.-E.; Kyzdarbekova, G.; Dankina, G. The Impact of Climate Change on the Water Systems of the Yesil River Basin in Northern Kazakhstan // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – P. 15-45. https://doi.org/10.3390/su152215745

16 Shahgedanova M., Afzal M., Hagg W., Kapitsa V., Kasatkin N., Mayr E., Rybak O., Saidaliyeva Z., Severskiy I., Usmanova Z., Wade A., Yaitskaya N., Zhumabayev D. Emptying Water Towers? Impacts of Future Climate and Glacier Change on River Discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia // Water. – 2020. – Vol. 12. – P. 627. DOI: 10.3390/w12030627.

17 Lobanova A., Didovets I, Menz C., Umirbekov A., Babagalieva Z., Hattermann F., Krysanova V. Rapid assessment of climate risks for irrigated agriculture in two pilot regions in the Aral Sea Basin // Agricultural Water Management. – 2021. – Vol. 243. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.10638.

18 Didovets I., Lobanova A., Krysanova V., Menz C., Babagalieva Z., Nurbatsina A., Gavrilenko N., Khamidov V., Umirbekov A., Qodirov S., Muhyyew D., Hattermann F. Central Asian rivers under climate change: impacts assessment in eight representative catchments // Journal of Hydrology: Regional studies. – 2021. – Vol. 34. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100779

19 Sairov, S.B.; Serikbay, N.T.; Rodrigo-Ilarri, J.; Abdrakhimov, R.G.; Rodrigo-Clavero, M.-E. Climate-Driven Changes in Annual Flow Patterns: A Comprehensive Analysis of the Buktyrma River (Kazakhstan) // Water. – 2024. – Vol. 16, P.1114. https://doi.org/10.3390/w16081114

20 Tursunova A., Alimkulov S., Saparova A. Resources of River Runoff of Kazakhstan // International Journal of Engineering and Advanced Technology. – 2019. – Vol. 8. – P. 2242-2250. 10.35940/ijeat.F8626.088619.

21 Talipova E., Shrestha S., Alimkulov S., Nyssanbayeva A., Tursunova A., Isakan G. Influence of climate change and anthropogenic factors on the Ile River basin streamflow, Kazakhstan // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – Vol. 14(17). – P. 1756.

22 Zhupankhan Aibek, Kamshat Tussupova, Ronny Berndtsson. Water in Kazakhstan, a key in Central Asian water management // Hydrological Sciences Journal. – 2018. – Vol. 63:5. – P. 752-762. DOI: 10.1080/02626667.2018.1447111

23 Kaliyeva K., Punys P., Zhaparkulova Y. The Impact of Climate Change on Hydrological Regime of the Transboundary River Shu Basin (Kazakhstan–Kyrgyzstan): Forecast for 2050 // Water. – 2021. – Vol. 13. – P. 2800. https://doi.org/10.3390/w13202800

24 Ma C., Sun L., Liu S., Shao M., Luo Y. Impact of climate change on the streamflow in the glacierized Chu River Basin, Central Asia // Journal of Arid Land. – 2015. – Vol. 7(4). – P. 501–513. DOI: 10.1007/s40333-015-0041-0

25 Schaffhauser T., Lange S., Tuo Y., Disse, M. Shifted discharge and drier soils: Hydrological projections for a Central Asian catchment // Journal of Hydrology: Regional Studies. – 2023. – Vol. 46. – P. 101338.

26 Radchenko I., Dernedde Y., Mannig B., Frede H. G., Breuer L. Climate change impacts on runoff in the Ferghana Valley (Central Asia) // Water Resources. – 2017. – Vol. 44. – P. 707-730.

27 Ресурсы поверхностных вод СССР. – Т. 15.Алтай и Западная Сибирь. – Вып. 1. Горный Алтай и Верхний Иртыш. – Л.: Гидрометеоиздат, 1969. – 318 с.

28 Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление, Т. VII, Кн. 1: Возобнавляемые ресурсы поверхностных вод западного, северного, центрального и восточного Казахстана/ под науч. ред. Р.И. Гальперина. – Алматы: ТОО «Арко», 2012. – 684 с.

29 Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные, части 1-6. Вып.18 Казахская ССР, книга 3-.Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 607с.

30 Справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1966, вып.18, ч. 2: Температура воздуха и почвы. 653 с.

31 Справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1969, вып.18, ч. 4: Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. 330 с.

32 Усовершенствовать методы долгосрочного и краткосрочного прогнозов водности рек, притока воды в крупные водохранилища Казахстана и унифицировать программные средства. – Отчет о НИР/КазНИГМИ. – 1999. - 240 с.)

33 Шульц В.Л. Реки Средней Азии. – Л.: Гидрометеоиздат. 1963. – 691 с.

34 Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи //Методы. Примеры. – 2001. – Т. 2. – С. 58-65.

35 Афанасьев, А.Н. Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР; Наука: Москва, Россия, 1967; 233 с.

36 WMO (World Meteorological Organization). International Glossary of Hydrology; No. 385; WMO: Geneva, Switzerland, 2012.

37 Raghunath H.M. Hydrology: Principles, Analysis, and Design; New Age International (P) Ltd.: New Delhi, India, 2006.

38 Arnold J.G., Allen P.M., Bernhardt G. A comprehensive surface-groundwater flow model // Journal of Hydrology. – 1993. -Vol. 142. – P. 47–69 https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90004-S

39 Krysanova V., Meiner A., Roosaare J., Vasilyev A. Simulation modelling of the coastal waters pollution from agricultural watershed // Ecol. Modell. – 1989. – Vol. 49. – P. 7–29. https://doi.org/10.1016/0304-3800(89)90041-0

40 Krysanova V., Müller-Wohlfeil D., Becker A. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds // Ecol. Modell. – 1998. – P. 261–289. https://doi.org/10.1016/S0304-3800(97)00204-4

41 Лакин Г. Ф. Биометрия. — М.: Высшая школа, 1990. — 352 с.

42 Priestley C., Taylor R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters // Monthly weather review. – 1972. – Vol. 100(2). – P. 81-92.

43 Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. In Symposia of the society for experimental biology. – Cambridge: Cambridge University Press (CUP)., 1965. - Vol. 19. – P. 205-234.

44 Arnold J.G., Williams J.R., Nicks A.D.., Sammons N.B. SWRRB; a basin scale simulation model for soil and water resources management. – Texas: A&M University Press, 1990. – P. 252

45 Rycroft D. W., Smedema L. K. Land drainage: planning and design of agricultural drainage systems. - London: Batsford Academic & Educational, 1983.

46 Krysanova V., Hattermann F., Huang S., Hesse C., Vetter T., Liersch S., Koch H., Kundzewicz Z.W. Modelling climate and land-use change impacts with SWIM: lessons learnt from multiple applications // Hydrological Sciences Journal. – 2015. – Vol. 60(4). – P. 606–635. https://doi.org/10.1080/02626667.2014.925560

47 Didovets I., Krysanova V., Bürger G., Snizhko S., Balabukh V., Bronstert A. Climate change impact on regional floods in the Carpathian region // Journal of Hydrology: Regional Studies – 2019. – P. 22. DOI:10.1016/j.ejrh.2019.01.002

48 Koch H., Liersch S., Hattermann F.F. Integrating water resources management in eco-hydrological modelling // Water Science and Technology. – 2013. – Vol. 67. – P. 1525–1533. DOI: 10.2166/wst.2013.022

49 Liersch S., Tecklenburg J., Rust H., Dobler A., Fischer M., Kruschke T., Koch H. Hattermann, F. F. Are we using the right fuel to drive hydrological models? A climate impact study in the Upper Blue Nile // Hydrology and Earth System Sciences – 2018. – Vol. 22. – P. 2163–2185. DOI: 10.5194/hess-22-2163-2018

50 Lobanova A., Liersch S., Nunes J.P., Didovets I., Stagl J., Huang S., Koch H., Rivas López M. del R., Maule C.F., Hattermann F., Krysanova V. Hydrological impacts of moderate and high-end climate change across European river basins // Journal of hydrology: Regional studies. – 2018. – Vol. 18. – P. 15–30. DOI: 10.1016/j.ejrh.2018.05.003

51 Lobanova A., Didovets I, Menz C., Umirbekov A., Babagalieva Z., Hattermann F., Krysanova V. Rapid assessment of climate risks for irrigated agriculture in two pilot regions in the Aral Sea Basin // Agricultural Water Management. – 2021. – P. 243. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.10638
52 SRTM Data. SRTM 90m DEM Digital Elevation Database. https://srtm.csi.cgiar.org/. 2019.
53 Copernicus CORINE Land Cover URL https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover. 2019
54 European Commission Joint Research Centre European Soil Data Centre (ESDAC). https://esdac.jrc.ec.europa.eu/. 2019
55 Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., ... & Alsdorf D. The shuttle radar topography mission // Reviews of geophysics. – 2007. – Vol. 45(2).
56 Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled seamless SRTM data V4 // International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). – 2008.
57 Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. European Soil Data Centre: response to European policy support and public data requirements // Land Use Policy. - 2012.- Vol. 29. – P. 329–338. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.07.003.
58 Weedon G. P., Balsamo G., Bellouin N., Gomes S., Best M. J., Viterbo P. The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data // Water Resources Research. - 2014. - Vol. 50(9). – P. 7505-7514.
59 Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., et al. The ERA Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2011. – Vol. 137, P. 553–597. DOI: 10.1002/qj.828
60 Weedon G., Gomes S., Viterbo P., Shuttleworth WJ., Blyth E., Österle H., Adam J., Bellouin N., Boucher O., Best M. Creation of the WATCH forcing data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century // Journal of Hydrometeorology. – 2011. - Vol 12 (5). – P. 823–848. DOI: 10.1175/2011JHM1369.1
61 Nash J.E, Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models part I – a discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – Vol. 10. – P. 282–290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6
62 Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations // Transactions of the ASABE. – 2007. – Vol. 50. – P. 885-900. DOI: 10.13031/2013.23153
63 Bolatova A., Krysanova V., Lobanova A, Dolgikh S., Tursumbayeva M., Bolatov K. Modelling River discharge for the Oba and Ulbi river basins using the SWIM model. // NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, ISSN 2224–5278. – 2023. – Vol. 460. – P. 56–73. https://doi.org/10.32014/2023.2518-170X.312

64 Doherty J. Model-independent parameter estimation PEST // User Manual. – 2002.
65 ISIMIP - The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project. https://www.isimip.org/. 2019
66 Hempel S., Frieler K., Warszawski L., Schewe J., Piontek F. A trendpreserving bias correction – the ISMIP approach // Earth System Dynamics. – 2013. – Vol. 4(2). – P. 219–236. https://doi.org/10.5194/esd-4-219-2013
67 Fuss S., Canadell J. G., Peters G. P., Tavoni M., Andrew R. M., Ciais P., Yamagata, Y. Betting on negative emissions // Nature climate change. – 2014. – Vol. 4(10). – P. 850-853.
68 Bolatova A., Krysanova V., Lobanova A., Bolatov K. Assessment of climate change impacts for two tributary basins of the Irtysh River in Kazakhstan // Climate Research. – 2023. – Vol. 91. – P. 159-174. https://doi.org/10.3354/cr01726
69 Hagg W., Hoelzle M., Wagner S., Mayr E., Klose Z. Glacier and runoff changes in the Rukhk catchment, upper Amu-Darya basin until 2050 // Glob. Planet. Change. – 2013. – Vol. 110. – P. 62-73. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.05.005
70 Gan R., Luo Y., Zuo Q., Sun L. Effects of projected climate change on the glacier and runoff generation in the Naryn River Basin, Central Asia // J. Hydrol. – 2015. – Vol. 523. – P. 240–251. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.057
71 Russia UNEP WWF Central Asian climate change and water problems. Bishkek, Moscow. – 2006.
72 Sten Bergström. The HBV model – its structure and applications SMHI RH. – 1992. - №4. – 35 p.
73 Jan Seibert. HBV light version 2, User's Manual. Stockholm University // Department of Physical Geography and Quaternary Geology. – 2005. – 32 p.
74 Jan Seibert. Multi-criteria calibration of conceptual runoff model using a genetic algorithm // Hydrology and Earth Sciences. – 2000. – № 4(2). – P. 215-224.
75 Jia Q.Y., Sun F.H. Modeling and forecasting process using the HBV model in Liao river delta / The 18th Biennial Conference of International Society for Eco-logical Modelling // Environmental Sciences. – 2012. – № 8. – P. 122–128.
76 Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 311 с.
77 Болатова А.А., Тілләкәрім Т.А., М.Н. Раимжанова, Серікбай Н.Т., Багитова Б.Е., Болатов К.М. Результаты калибрования гидрологической модели HBV для горных рек Казахстана // Гидрометеорология и экология. – 2018. – № 3. – С. 110-124.
78 Adrenalinic silence. https://adrenalinicsilence.kz/nashi-poxody/kazaxstanskij-altaj. 08.10.2019.
79 Портал zakon.kz. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31214252&pos=4;-100#pos=4;-100. 27.06.2012.
80 Портал tengrinews.kz. https://tengrinews.kz/events/23-letnii-zitel-vko-utonul-v-rezultate-sieezda-masiny-v-reku-188398. 21.05.2011.
81 АО «Шульбинская ГЭС». https://www.samruk-energy.kz/ru/company/group-of-companies/ao-shulbinskaya-ges.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Значения среднегодовых температур воздуха, °С

Год	Усть-каменогорск	Лениногорск	Шемонаиха
1	2	3	4
1936	2,6	1,0	1,2
1937	1,1	0,1	1,8
1938	2,6	1,9	3,3
1939	3,0	2,7	-2,2
1940	3,8	2,7	2,2
1941	4,2	2,7	2,2
1942	3,7	1,9	2,1
1943	3,0	3,2	1,3
1944	2,4	1,5	1,0
1945	2,8	2,0	1,4
1946	3,7	1,8	2,0
1947	2,9	1,5	1,2
1948	2,5	2,5	2,6
1949	2,5	1,3	1,3
1950	1,5	1,2	0,3
1951	3,4	2,2	2,5
1952	0,4	0,7	0,4
1953	3,8	3,1	3,3
1954	-0,7	0,0	-1,0
1955	3,0	2,5	2,7
1956	1,5	1,3	1,5
1957	2,5	1,5	2,2
1958	1,8	1,3	1,5
1959	1,1	1,2	0,8
1960	0,6	0,7	0,1
1961	2,9	2,3	2,4
1962	3,8	3,5	3,5
1963	4,7	3,4	4,3
1964	3,2	1,8	2,2
1965	3,1	3,0	2,5
1966	1,4	1,0	0,7
1967	1,9	2,2	1,7
1968	2,7	1,7	1,9
1969	-0,2	-0,1	-0,9
1970	2,5	1,5	1,8
1971	3,6	2,7	3,0
1972	2,3	1,4	1,5
1973	4,3	3,1	3,3

Таблица А.1 - продолжение

1	2	3	4
1974	2,0	1,5	1,3
1975	3,2	2,5	2,6
1976	1,4	1,4	0,8
1	2	3	4
1977	2,9	2,9	2,6
1978	3,6	3,3	3,4
1979	2,7	2,0	2,3
1980	2,5	2,2	2,5
1981	3,0	2,8	3,2
1982	4,1	3,6	4,1
1983	4,8	3,9	4,6
1984	0,4	0,2	0,4
1985	1,6	1,7	1,4
1986	2,7	2,3	2,2
1987	2,8	2,0	2,4
1988	2,7	2,6	2,6
1989	4,0	3,3	3,9
1990	4,2	3,3	4,3
1991	3,6	3,1	3,6
1992	3,5	2,9	3,4
1993	2,0	1,7	2,1
1994	3,7	2,7	3,7
1995	3,6	3,3	4,1
1996	1,9	1,2	2,0
1997	4,6	4,5	5,1
1998	2,7	3,0	3,1
1999	3,4	3,2	4,0
2000	2,8	2,7	3,3
2001	3,4	2,6	3,8
2002	5,1	4,0	5,2
2003	3,1	2,9	3,6
2004	3,7	2,9	4,0
2005	2,7	2,1	3,2
2006	3,6	3,1	4,0
2007	4,9	3,7	4,8
2008	4,5	3,1	4,1
2009	3,1	2,0	2,7
2010	2,1	1,3	1,7
2011	3,3	2,4	2,5
2012	2,2	1,7	1,9
2013	5,8	3,5	4,9

Таблица А.1 - продолжение

1	2	3	4
2014	4,2	2,4	3,2
2015	5,8	5,8	4,6
2016	4,6	4,4	3,7
2017	5,0	3,6	4,2
2018	3,2	1,3	2,3
2019	5,0	3,6	4,0
2020	5,9	4,0	5,0

Таблица А.2 – Значения сумм годовых осадков

Год	Усть-каменогорск	Лениногорск	Шемонаиха
1	2	3	4
1936		724	406
1937		789	388
1938		774	474
1939		602	390
1940		603	400
1941		569	241
1942		549	346
1943		0	286
1944		590	390
1945		521	261
1946		937	494
1947		921	562
1948		639	409
1949		691	369
1950		717	343
1951		506	326
1952		657	322
1953		437	412
1954		617	414
1955	263	500	267
1956	389	681	357
1957	560	759	449
1958	461	754	387
1959	594	614	371
1960	788	831	725
1961	532	763	497
1962	393	472	308
1963	379	502	375
1964	382	481	379

Таблица А.2 - продолжение

1	2	3	4
1965	515	627	495
1966	748	686	602
1967	351	641	345
1968	479	707	562
1969	505	698	493
1970	479	774	474
1971	497	626	449
1972	614	649	586
1973	441	701	425
1974	328	395	325
1975	497	597	480
1976	522	657	661
1977	550	599	512
1978	492	567	585
1	2	3	4
1979	563	739	607
1980	411	553	455
1981	393	439	408
1982	380	642	469
1983	410	585	475
1984	498	712	559
1985	484	683	525
1986	380	522	494
1987	522	778	613
1988	434	669	403
1989	476	591	539
1990	545	684	559
1991	384	570	454
1992	414	835	432
1993	488	796	479
1994	574	827	510
1995	470	692	472
1996	418	608	347
1997	389	396	302
1998	412	566	421
1999	443	642	373
2000	547	610	506
2001	591	618	510
2002	501	726	604
2003	380	404	390
2004	476	646	416

Таблица А.2 - продолжение

1	2	3	4
2005	498	593	371
2006	575	659	471
2007	427	667	443
2008	275	477	263
2009	653	795	551
2010	492	586	413
2011	391	542	390
2012	408	526	479
2013	529	703	477
2014	439	681	534
2015	527	527	533
2016	684	708	684
2017	384	547	343
2018	557	590	509
2019	580	642	505
2020	443	598	430

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1 – Значения средних месячных, годовых и сезонных расходов воды, м^3/с, по р.Оба – с. Шемонаиха за период с 1955 по 2020 год

Год	Месяц												Год	Зима	Весна	Лето-Осень
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I-XII	XI-II	III-V	VI-X
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1954	-	-	-	-	712	907	249	80	112	49	57	30	-	-	-	-
1955	21	22	39	267	726	108	37	24	84	65	29	45	122	32	344	64
1956	17	18	21	351	528	397	92	50	120	122	55	35	150	27	300	156
1957	28	22	26	280	768	378	140	226	44	109	143	41	184	35	358	179
1958	40	32	32	475	1070	574	327	137	92	154	89	43	255	64	526	257
1959	32	32	34	570	615	316	159	94	50	50	39	32	169	49	406	134
1960	38	30	21	288	868	685	302	240	115	120	87	37	236	35	392	292
1961	39	30	51	762	554	196	228	186	137	137	94	73	207	48	456	177
1962	46	36	57	568	572	172	49	32	28	134	44	35	148	62	399	83
1963	37	29	68	232	444	248	59	57	60	146	136	25	128	36	248	114
1964	13	8	12	391	640	265	67	51	31	43	29	18	131	45	348	91
1965	19	18	20	368	563	121	47	144	140	209	93	22	147	21	317	132
1966	20	22	34	513	1120	653	214	83	42	48	57	25	236	39	556	208
1967	13	9	34	447	245	64	171	112	68	126	439	24	146	26	242	108
1968	12	10	120	483	457	124	116	42	76	124	39	35	136	121	353	96
1969	22	27	26	426	987	380	95	49	99	239	162	31	212	31	480	172
1970	32	25	28	429	699	383	106	120	258	163	85	30	196	62	385	206
1971	24	27	34	631	1030	392	145	112	76	63	69	23	219	42	565	158
1972	33	21	23	430	859	280	170	67	82	67	80	26	178	37	437	133
1973	34	28	34	738	949	446	228	161	70	134	90	40	246	42	574	208
1974	19	18	23	588	391	131	43	26	104	99	26	28	125	42	334	81
1975	26	19	18	367	793	575	109	52	92	164	98	34	196	25	393	198
1976	30	24	28	536	708	156	205	83	98	373	79	27	196	47	424	183
1977	16	29	39	733	681	206	97	154	79	248	68	36	199	38	484	157
1978	31	21	39	619	382	422	95	92	35	97	84	47	164	39	347	148
1979	35	26	30	304	1160	441	276	107	84	287	186	65	250	48	498	239
1980	42	45	54	412	371	281	115	74	42	50	100	53	137	85	279	112
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1981	37	29	45	540	440	139	66	38	31	51	36	27	123	55	342	65
1982	34	35	31	498	425	130	38	29	35	208	84	31	131	33	318	88
1983	28	23	32	273	750	311	73	33	78	106	110	34	154	41	352	120
1984	27	22	31	236	632	243	124	131	33	150	87	34	146	48	300	136
1985	36	33	30	505	658	356	136	89	66	270	119	35	194	47	398	183
1986	30	28	30	314	664	306	79	60	60	111	60	32	148	53	336	123
1987	26	29	30	434	914	321	147	58	162	238	111	68	212	37	459	185
1988	59	40	38	583	828	315	99	106	95	113	100	36	201	69	483	146
1989	32	25	37	441	964	320	101	71	69	170	88	65	199	48	481	146
1990	45	38	56	645	1140	258	249	254	88	78	119	44	251	59	614	185
1991	39	32	38	501	525	137	65	64	89	123	56	38	142	59	355	96
1992	26	23	24	555	569	268	87	152	375	143	60	35	193	36	383	205
1993	31	38	53	491	850	608	129	65	69	71	60	32	208	41	465	188
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1994	31	30	35	513	771	141	67	165	159	58	255	69	191	38	440	118
1995	36	26	56	470	546	334	192	211	71	115	80	44	182	96	357	185
1996	29	22	21	417	583	171	187	56	118	86	59	26	148	44	340	124
1997	37	31	62	833	441	88	51	32	30	28	32	16	140	38	445	46
1998	9	8	10	193	689	169	57	22	19	30	24	17	104	16	297	59
1999	8	7	6	213	429	135	64	53	109	146	49	16	103	14	216	101
2000	8	6	18	398	372	208	94	38	39	54	51	26	109	20	263	86
2001	26	19	20	507	976	208	159	55	39	131	75	31	187	30	501	118
2002	22	16	78	489	807	511	313	69	55	109	40	29	211	36	458	211
2003	22	9	17	304	424	104	74	48	31	73	34	16	96	25	248	66
2004	10	13	24	411	689	193	93	32	32	66	36	26	135	18	375	83
2005	21	8	22	522	396	278	107	91	39	48	44	21	133	23	313	112
2006	9	14	19	366	561	228	81	96	69	189	141	34	151	22	315	133
2007	27	28	29	663	705	292	177	38	25	29	38	52	175	57	466	112
2008	34	13	34	568	360	96	48	32	64	57	54	25	115	34	321	59
2009	13	8	13	480	559	289	120	144	152	166	130	17	174	25	351	174
2010	9	7	15	425	781	294	115	50	28	41	44	39	154	41	407	106
2011	14	7	13	589	319	199	90	29	21	32	34	24	114	26	307	74
2012	10	5	18	405	208	101	129	60	70	133	42	36	101	18	210	99

Таблица Б.1 - продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2013	13	14	184	843	743	408	159	245	113	143	92	67	252	26	590	214
2014	8	6	80	417	625	440	144	89	42	353	158	36	200	43	374	214
2015	7	4	14	664	763	276	149	60	116	165	75	23	193	51	480	153
2016	18	11	110	929	603	431	217	166	44	133	42	27	228	32	547	198
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2017	26	23	63	766	633	186	98	51	75	142	81	11	180	29	487	110
2018	24	23	103	490	493	332	72	45	69	79	55	49	153	35	362	119
2019	24	23	42	514	394	309	66	72	57	174	120	25	152	38	317	136
2020	19	24	97	923	433	91	56	53	103	130	107	21	172	47	484	87

Таблица Б.2 – Значения средних месячных, годовых и сезонных расходов воды, м^3/с, по р.Ульби – с.Ульби - Перевалочная за период с 1955 по 2020 год

Год	Месяц											Год	Зима	Весна	Лето-Осень
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I-XII	XI-II	III-V	VI-X
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1954	12	13	17	170	436	549	172	62	85	38	50	21	135	-	-	-
1955	20	25	30	115	533	78	24	17	36	29	21	18	79	29	226	37
1956	17	14	14	225	338	300	72	34	53	56	61	25	101	18	192	103
1957	18	18	30	188	427	261	66	143	43	53	89	44	115	30	215	113
1958	28	22	24	321	692	344	225	72	43	74	54	25	160	46	346	151
1959	18	20	22	350	346	173	89	65	41	40	33	24	102	29	239	82
1960	19	22	20	214	420	377	168	141	53	55	46	34	131	24	218	159
1961	26	25	46	333	275	114	112	75	67	62	54	29	101	33	218	86
1962	22	24	38	261	291	83	23	17	17	46	26	11	72	32	197	37
1963	12	16	33	114	196	127	31	26	27	80	69	23	63	16	114	58
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1964	24	19	23	205	379	189	51	30	23	27	25	18	84	34	202	64
1965	15	18	23	186	260	67	27	59	67	116	78	23	78	19	156	67
1966	18	15	26	263	767	423	130	50	25	25	35	13	149	33	352	131
1967	13	16	27	244	177	42	96	93	51	95	40	19	76	19	149	75
1968	16	14	83	301	329	58	51	15	25	44	25	17	82	22	238	39
1969	14	9	19	235	660	235	65	34	57	114	74	43	130	16	305	101
1970	21	21	34	233	368	203	54	51	131	97	44	24	107	40	212	107
1971	26	24	34	306	590	255	104	55	26	22	25	19	124	29	310	92
1972	18	16	17	247	503	219	116	34	34	25	38	25	108	19	256	85
1973	20	16	26	412	492	227	83	45	29	38	33	16	120	25	310	84
1974	15	15	21	280	167	47	20	13	30	36	16	14	56	20	156	29
1975	15	16	23	202	438	295	55	26	42	72	42	25	104	15	221	98
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1976	24	19	20	300	366	114	57	30	53	197	39	25	104	28	229	90
1977	21	20	20	369	308	105	53	66	32	82	38	18	94	26	232	68
1978	23	20	27	338	177	185	40	33	17	30	33	26	79	25	181	61
1979	18	19	17	196	694	337	144	64	65	174	87	39	154	24	302	157
1980	23	24	26	214	242	203	69	25	16	17	34	19	76	43	161	66
1981	11	13	23	327	310	87	31	14	13	23	20	14	74	19	220	34
1982	16	18	14	260	236	63	13	9	12	92	47	27	67	17	170	38
1983	15	15	28	171	466	185	39	18	34	47	43	25	90	26	222	64
1984	24	16	20	135	329	147	49	38	19	56	26	25	74	27	161	62
1985	21	21	19	267	356	192	68	49	37	99	55	21	100	23	214	89
1986	19	20	20	182	351	138	39	24	20	34	22	15	74	29	184	51
1987	18	19	19	212	419	168	59	25	56	86	48	24	96	19	217	79
1988	21	19	25	277	402	173	57	53	43	61	52	14	100	28	235	77
1989	16	8	28	226	382	181	52	30	30	67	34	34	91	22	212	72
1990	21	14	27	331	562	163	118	103	41	37	51	26	124	26	307	92
1991	9	10	12	271	271	81	34	32	40	56	30	25	73	24	185	49
1992	23	18	21	350	348	152	60	86	224	92	35	24	119	24	240	123
1993	21	19	38	285	436	313	83	43	40	38	33	24	114	25	253	103
1994	25	24	30	297	434	102	44	66	47	36	136	35	100	27	254	59
1995	24	12	28	247	298	173	75	77	44	60	47	18	92	52	191	86
1996	14	21	19	239	297	100	60	24	56	44	33	19	77	25	185	57
1997	19	18	45	458	226	59	31	18	16	16	14	14	78	22	243	28
1998	17	17	15	151	537	167	43	21	19	23	16	12	86	16	234	54
1999	13	15	13	168	272	96	31	18	48	81	28	14	67	14	151	55
2000	15	17	27	240	235	135	49	21	18	29	26	19	69	19	167	50
2001	20	17	25	351	659	176	74	33	25	60	48	17	125	21	345	73

Таблица Б.2 - продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2002	16	21	-	-	-	-	-	-	29	33	25	22	-	-	-	-
2003	13	12	17	156	233	66	35	23	16	43	31	18	55	18	135	37
2004	12	13	43	307	414	130	66	25	22	31	27	22	93	19	255	55
2005	16	16	25	321	226	153	58	39	23	22	24	18	79	20	191	59
2006	18	24	25	246	324	105	38	36	30	86	91	34	88	21	198	59
2007	18	17	20	361	375	186	99	30	22	23	22	18	99	40	252	72
2008	15	18	44	306	225	73	29	15	23	32	28	17	69	18	192	34
2009	17	18	19	306	357	182	72	59	60	72	87	21	106	20	227	89
2010	23	17	30	272	536	211	71	39	25	28	31	24	109	37	279	75
2011	11	18	20	412	224	116	60	33	19	24	31	17	82	21	219	50
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2012	11	12	16	231	123	50	57	27	28	52	32	24	55	18	123	43
2013	22	18	121	464	413	270	112	147	53	62	46	34	147	24	333	129
2014	20	15	60	243	150	127	135	98	23	160	70	21	94	29	151	109
2015	15	21	22	406	332	150	57	23	43	75	43	22	101	32	253	70
2016	14	15	57	435	310	223	143	85	25	51	50	16	119	24	267	105
2017	18	22	36	366	284	86	33	16	29	60	44	24	85	26	229	45
2018	17	12	88	238	226	172	40	18	25	26	25	18	76	24	184	56
2019	21	19	46	232	191	163	33	22	21	53	57	19	73	21	156	58
2020	14	15	25	347	205	39	22	19	25	35	27	20	66	26	192	28

Таблица Б.3 - Расходы воды р. Оба – с. Шемонаиха и р. Ульби – с. Ульби Перевалочная и их обеспеченность

Год	р. Оба – с. Шемонаиха		р. Ульби – с. Ульби Перевалочная		Суммарный сток	
	Расход воды, м^3/с	Обеспеченность, %	Расход воды, м^3/с	Обеспеченность, %	Расход воды, м^3/с	Обеспеченность, %
1	2	3	4	5	6	7
1955	122	85.9	79	74	201	84
1956	150	63.6	101	36.4	251	55.6
1957	184	35.4	115	19.3	299	28.9
1958	255	6.23	160	1.43	415	2.73
1959	169	47.1	102	34.9	271	43.6
1960	236	10.2	131	8.44	367	8.23
1961	207	21.4	101	36.4	308	25.2
1962	148	65.4	72	84.4	220	74.4
1963	128	81.8	63	94.2	191	88.4
1964	131	59	84	64.2	215	62.9
1965	147	66.4	78	74.9	225	71.3
1966	236	10.2	149	2.75	385	5.4
1967	146	67.3	76	78.3	222	73.2
1968	136	75.7	82	69.3	218	75.5
1969	212	19.1	130	8.87	342	13.9
1970	196	27.5	107	28.2	303	27.2
1971	219	16.5	124	12.5	343	13.6
1972	178	39.8	108	27	286	35.4
1973	246	8.07	120	15.5	366	8.39
1974	125	83.8	56	97.9	181	91.9
1975	196	27.5	104	32	300	28.5
1976	196	27.5	104	32	300	28.5

1977	199	25.8	94	47	293	31.8
1978	164	51.2	79	73.3	243	60.5
1979	250	7.25	154	2.15	404	3.49
1980	137	74.9	76	78.5	213	78.4
1981	123	85.2	74	81.6	197	86.8
1982	131	79.7	67	90.1	198	85.3
1983	154	59.8	90	53.7	244	59.9
1984	146	67.3	74	81.7	220	74.4
1985	194	28.5	100	37.8	294	31.2
1986	148	65.4	74	81.8	222	73.2
1987	212	19.1	96	43.9	308	25.2
1988	201	24.7	100	38.1	301	28.1
1989	199	25.8	91	53.4	290	33.3
1990	251	7.04	124	12.5	375	6.98
1991	142	70.9	73	83.1	215	77.3
1992	193	29.1	119	16.3	312	23.5
1993	208	20.9	114	20	322	19.5
1994	191	30.3	100	37.8	291	32.8
1995	182	36.9	92	51.1	274	41.9
1996	148	65.4	77	76.7	225	71.3
1997	140	72.5	78	75.6	218	75.5
1998	104	95.8	86	60.7	190	88.8
1999	103	96.1	67	90.6	170	95.1
2000	109	93.8	69	87.6	178	92.8
2001	187	33.2	125	11.8	312	23.5
2002	211	19.5	110	18.5	321	18.1
2003	94	93.2	55	98.3	149	95.9
2004	135	76.5	93	49.2	228	69.5
2005	133	78.1	79	73.7	212	79
2006	151	62.6	88	57.9	239	62.9
2007	175	42.2	99	39.3	274	41.9
2008	115	90.6	69	87.7	184	91
2009	174	43	106	29.3	280	38.6
2010	154	59.8	109	25.8	263	48.2
2011	114	91.1	82	68.4	196	86.2
2012	101	96.7	55	98.2	156	97.5
2013	252	6.84	147	2.99	399	3.95
2014	200	25.3	94	48.4	294	31.2
2015	193	29.1	101	36.4	294	31.2
2016	228	15.8	119	16.3	347	12.5
2017	180	30.3	85	66.7	265	41.9
2018	153	60.7	76	83.8	229	71.3
2019	152	63	73	81	225	73.1
2020	172	46	66	90	237	62

ПРИЛОЖЕНИЕ В

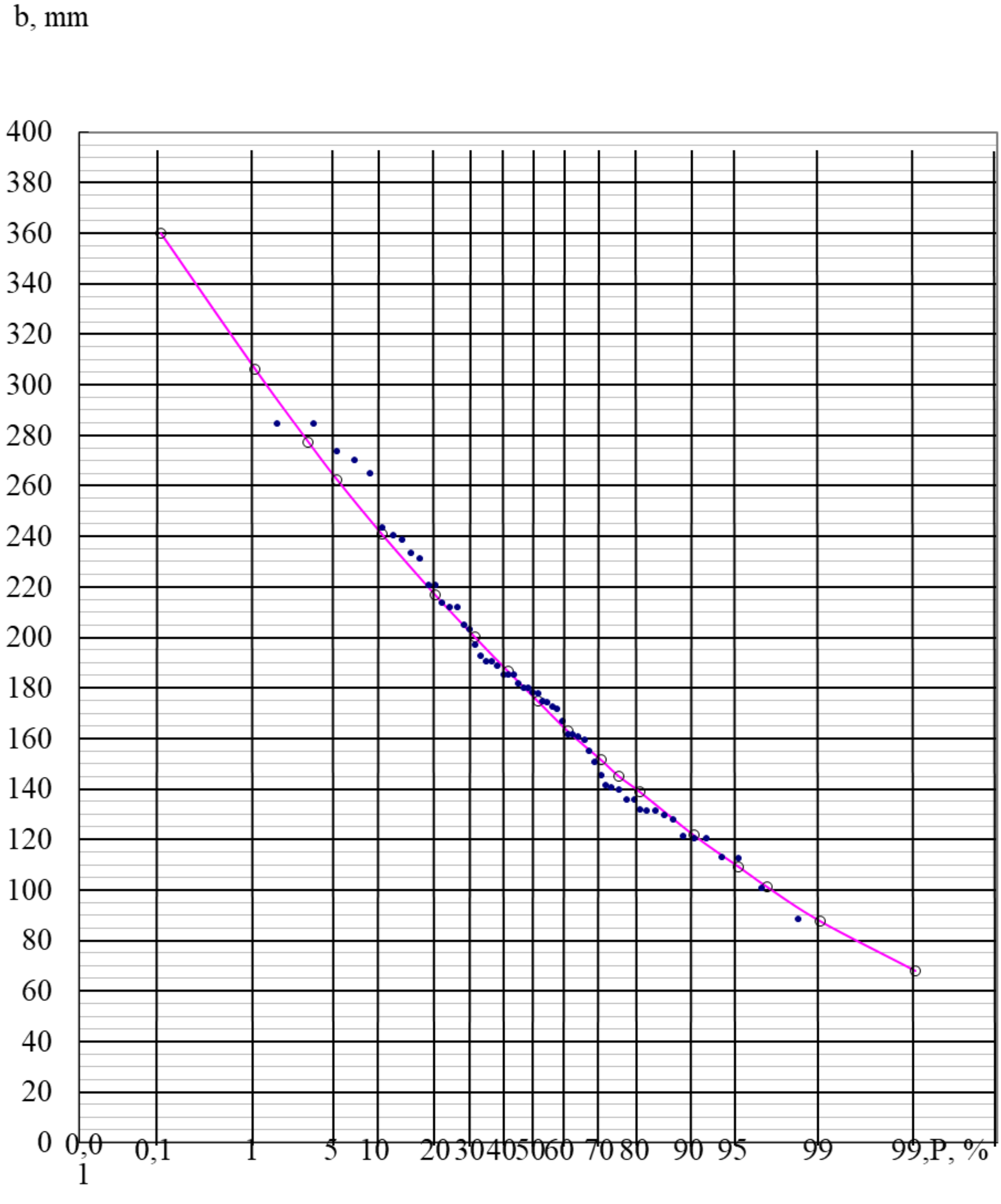


Рисунок В.1 - Кривая обеспеченности средних годовых расходов воды на р.Оба за период 1936-1994 гг.

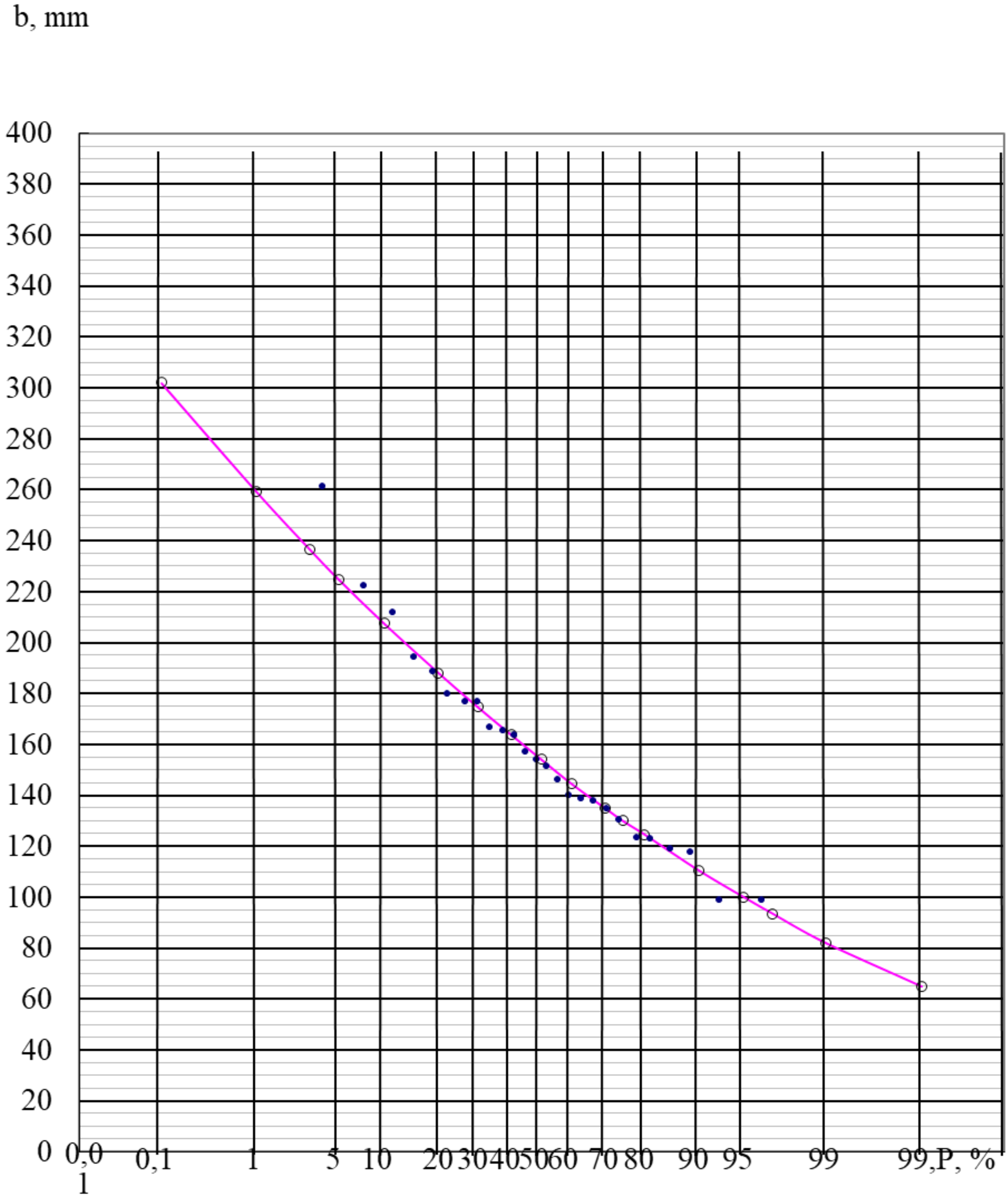


Рисунок В.2 - Кривая обеспеченности средних годовых расходов воды на р.Оба за период 1995-2020 гг.

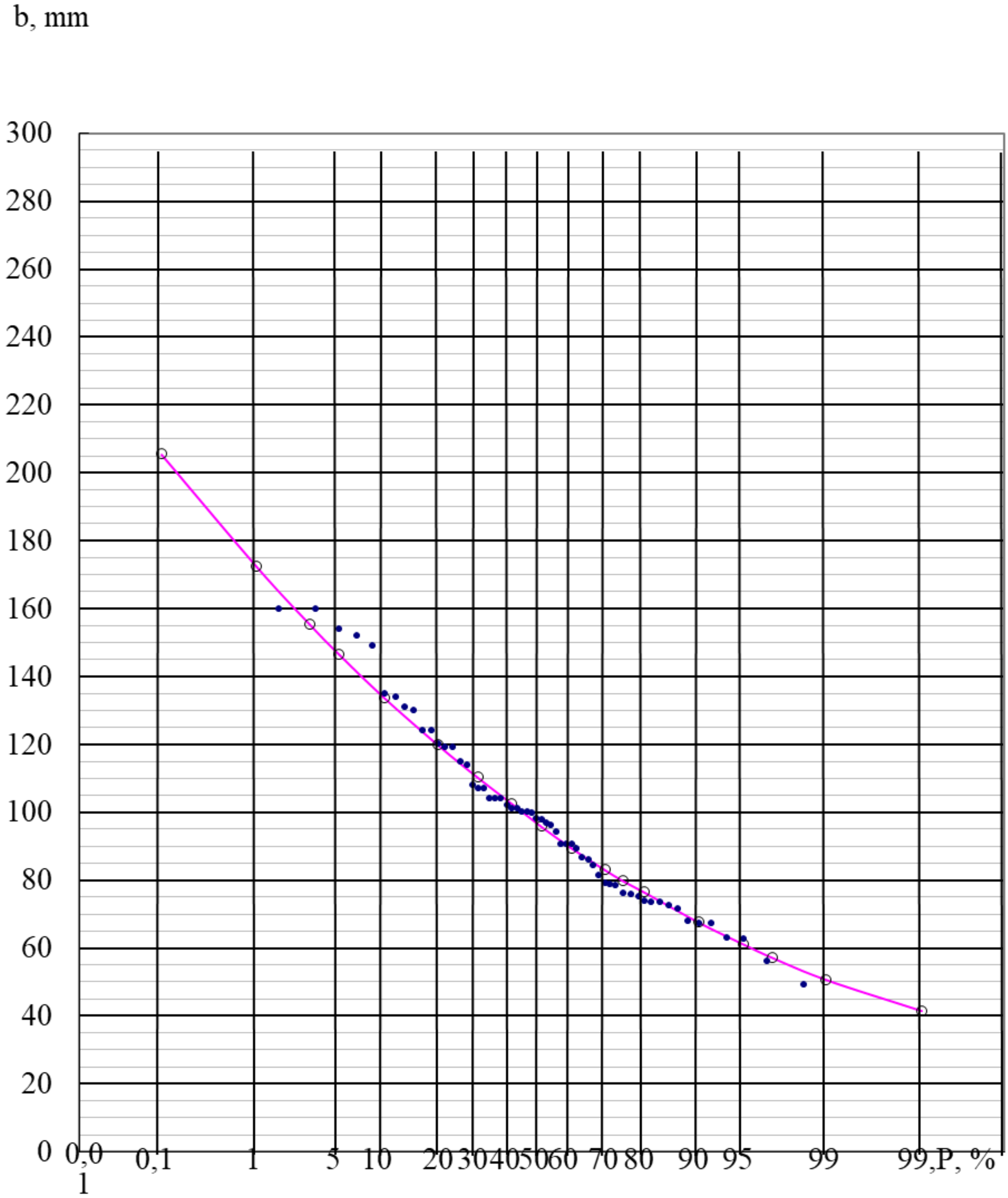


Рисунок В.3 - Кривая обеспеченности средних годовых расходов воды на р.Ульби за период 1936-1994 гг.

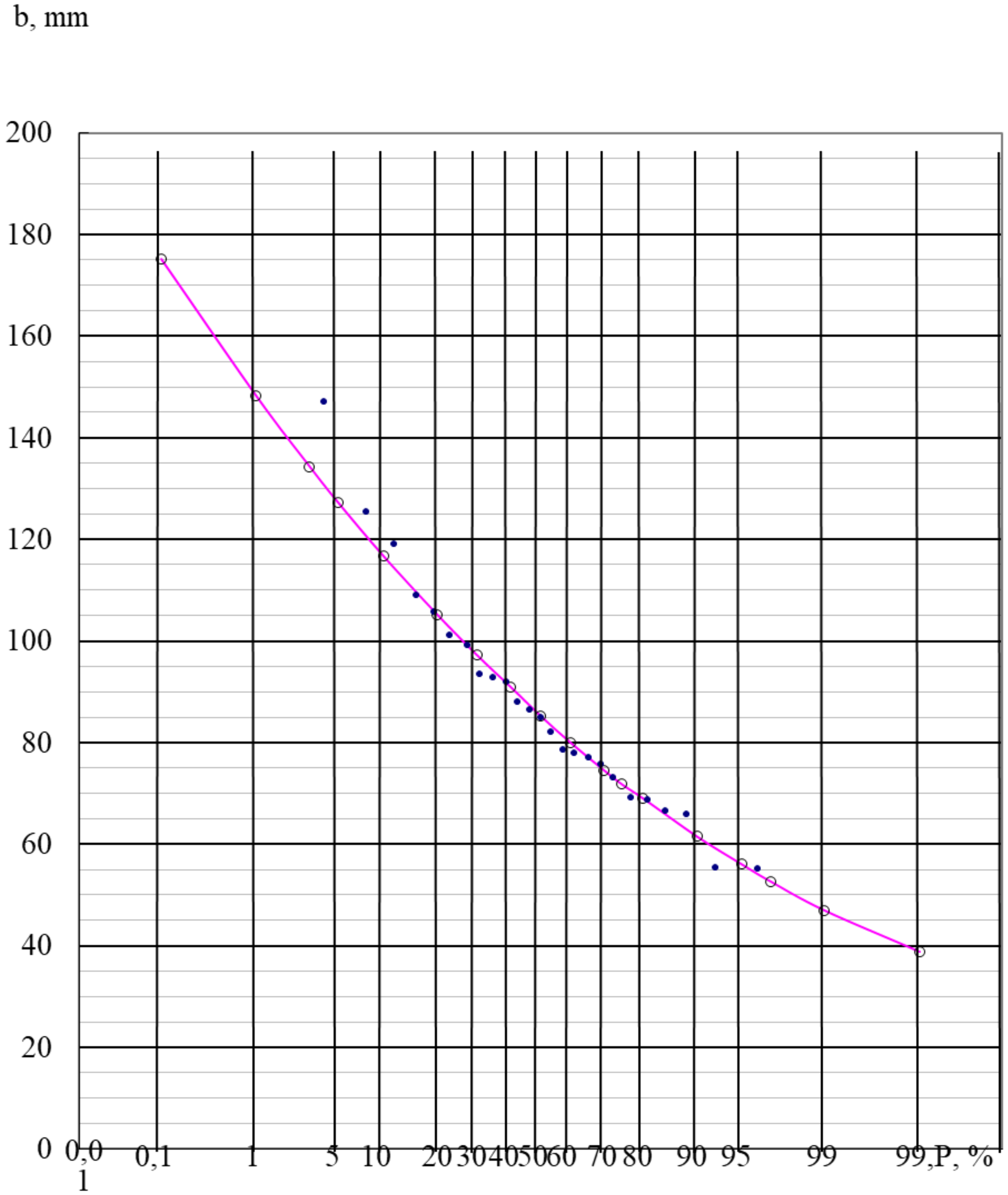


Рисунок В.4 - Кривая обеспеченности средних годовых расходов воды на р.Ульби за период 1995-2020 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г.1 – Значения наибольшего за зиму запас воды в снеге (мм)

Годы	Лениногорск	Шемонаиха
1	2	3
1970-1971	53	76
1971-1972	23	38
1972-1973	31	63
1973-1974	21	38
1974-1975	48	47
1975-1976	72	53
1976-1977	44	109
1977-1978	31	53
1978-1979	52	79
1979-1980	50	43
1980-1981	59	30
1981-1982	69	45
1982-1983	26	37
1983-1984	44	28
1984-1985	86	65
1985-1986	76	63
1986-1987	76	46
1987-1988	98	63
1988-1989	72	45
1989-1990	63	81
1990-1991	67	75
1991-1992	90	94
1992-1993	36	61
1993-1994	105	47
1994-1995	51	38
1995-1996	77	28
1996-1997	94	49
1997-1998	67	89
1998-1999	55	53
1999-2000	51	58
2000-2001	50	115
2001-2002	33	21
2002-2003	77	59
2003-2004	69	60
2004-2005	74	51
2005-2006	68	68
2006-2007	29	53
2007-2008	43	22

Таблица Г.1 - продолжение

1	2	3
2008-2009	79	88
2009-2010	54	88
2010-2011	66	62
2011-2012	66	65
2012-2013	72	164
2013-2014	30	73
2014-2015	60	116
2015-2016	74	129
2016-2017	142	148
2017-2018	51	41
2018-2019	77	72
2019-2020	48	182
2020-2021	63	85

Таблица Г.2 – Значения средней декадной высоты снежного покрова по постоянной рейке (см)

Годы	Лениногорск	Шемонаиха
1	2	3
1970-1971	33	78
1971-1972	27	47
1972-1973	42	47
1973-1974	14	43
1974-1975	39	37
1975-1976	48	74
1976-1977	38	56
1977-1978	20	54
1978-1979	39	74
1979-1980	21	40
1980-1981	34	32
1981-1982	38	43
1982-1983	33	35
1983-1984	28	31
1984-1985	26	48
1985-1986	31	58
1986-1987	20	43
1987-1988	19	51
1988-1989	39	49
1989-1990	38	80
1990-1991	31	61
1991-1992	44	66

Таблица Г.2 - продолжение

1	2	3
1992-1993	33	62
1993-1994	70	30
1994-1995	32	31
1995-1996	48	26
1996-1997	67	40
1997-1998	58	74
1998-1999	35	30
1999-2000	23	45
2000-2001	101	83
2001-2002	20	18
2002-2003	45	59
2003-2004	46	31
2004-2005	39	36
2005-2006	26	60
2006-2007	23	42
2007-2008	36	18
2008-2009	68	64
2009-2010	68	70
2010-2011	83	41
2011-2012	49	45
2012-2013	73	98
2013-2014	41	48
2014-2015	61	59
2015-2016	57	65
2016-2017	95	69
2017-2018	36	37
2018-2019	48	52
2019-2020	41	104

Таблица Г.3 – Даты разрушения устойчивого снежного покрова

Годы	Шемонаиха	Лениногорск
1	2	3
1978-1979	22.04	28.04
1979-1980	12.04	03.05
1980-1981	13.04	14.04
1981-1982	08.04	10.04
1982-1983	26.04	23.05
1983-1984	25.04	19.05
1984-1985	07.04	26.04
1985-1986	13.04	25.04

Таблица Г.3 - продолжение

1	2	3
1986-1987	15.04	17.04
1987-1988	10.04	09.05
1988-1989	29.04	03.05
1989-1990	06.04	12.04
1990-1991	15.04	04.05
1991-1992	13.04	05.05
1992-1993	11.05	11.05
1993-1994	10.04	24.05
1994-1995	28.03	18.05
1995-1996	05.04	14.05
1996-1997	28.03	06.04
1997-1998	20.05	22.05
1998-1999	26.04	26.04
1999-2000	02.04	12.04
2000-2001	10.04	29.04
2001-2002	15.04	18.05
2002-2003	01.05	01.05
2003-2004	18.04	21.04
2004-2005	13.04	18.04
2005-2006	10.04	03.05
2006-2007	31.03	10.05
2007-2008	19.04	02.05
2008-2009	18.03	06.05
2009-2010	15.04	26.04
2010-2011	09.04	16.04
2011-2012	01.04	07.04
2012-2013	04.04	14.05
2013-2014	24.04	25.04
2014-2015	13.04	30.04
2015-2016	30.03	08.04
2016-2017	03.05	04.05
2017-2018	12.04	15.05
2018-2019	02.05	16.05
2019-2020	05.04	14.04
2020-2021	06.04	21.04

Таблица Г.4 – Число дней со снежным покровом

Годы	Лениногорск	Шемонаиха
1	2	3
1978-1979	180	157
1979-1980	170	168
1980-1981	155	136
1981-1982	163	153
1982-1983	145	145
1983-1984	165	147
1984-1985	176	159
1985-1986	187	181
1986-1987	180	163
1987-1988	183	166
1988-1989	160	141
1989-1990	173	157
1990-1991	164	161
1991-1992	169	149
1992-1993	178	156
1993-1994	179	153
1994-1995	166	143
1995-1996	177	147
1996-1997	171	153
1997-1998	173	155
1998-1999	167	153
1999-2000	154	144
2000-2001	194	163
2001-2002	154	131
2002-2003	158	145
2003-2004	171	147
2004-2005	183	156
2005-2006	173	145
2006-2007	147	132
2007-2008	163	132
2008-2009	152	148
2009-2010	175	167
2010-2011	156	137
2011-2012	166	152
2012-2013	147	153
2013-2014	162	123
2014-2015	169	159
2015-2016	185	151
2016-2017	168	163
2017-2018	167	145
2018-2019	161	151
2019-2020	171	148
2020-2021	172	149

Таблица Г.5 – Значения среднемесячных и средних за холодный период осадков на МС Лениногорск

Год	Среднемесячная сумма осадков												Средние за холодный период осадки
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1978	11	9,5	14,4	71,7	23,4	149,2	61,3	69,9	31,4	50,6	37,7	37	11,5
1979	34,9	17,9	7,1	54,8	130,6	59,7	110,7	93,5	70,1	90,1	47,2	22	28,3
1980	16,2	8,6	12	19,7	35,6	189,6	75,1	15,7	38	19,1	105,9	17	20,4
1981	12,3	6,7	22,4	69,3	54,9	18,8	77,6	33,6	59,2	31,2	27,8	25,5	29,4
1982	25,5	9,1	33,7	61	101,8	48,2	57,2	59,8	56,9	127,5	38,8	22,8	24,5
1983	6,6	5,7	15,8	36	170,3	20,6	38,7	56,2	112,7	39,7	65,3	17,7	16,1
1984	9,1	4,4	40,3	48	80,9	113,7	134,8	65,7	52,2	69	80,6	12,8	24,3
1985	5,9	7,1	7,5	44,9	64,2	65,8	104,8	131,6	27,6	162,7	54,4	6,7	20,0
1986	5,8	4,9	9,9	33,4	107,5	72,9	52,3	59,9	61,9	67,7	21,4	24,4	14,6
1987	19,3	17,2	11	45,9	117,7	80,9	85	92,8	116	78,1	59,8	54,1	18,8
1988	23,1	10	5,5	27,4	132,4	49,8	81,3	108	78,1	79,7	29,8	43,9	29,3
1989	19,2	12,8	1,4	45,1	107,3	61,6	50,4	37,6	91,2	98	28,3	38,4	21,1
1990	16,3	19,7	39,6	48,6	74,3	27,5	163,1	98,1	48,3	41,3	81,2	26	26,4
1991	22,8	11,7	29,6	10,6	22,9	68,4	73,4	97	109,2	45,3	36,9	42,5	32,4
1992	15,1	18,6	10,9	96,9	76,4	80,6	136,5	148,9	152,7	43,1	25,5	30,2	23,2
1993	12,4	35,4	37,1	72,8	79	154,9	96,9	70,2	84,2	46,3	75,3	31	25,5
1994	15,9	25,3	16,7	56	137,6	60,7	127,5	117,1	52,4	37,8	139,8	40,2	30,0
1995	9,7	16,3	28,3	53,5	115	74,6	122	96,6	38,7	66,8	39,8	30,5	40,7
1996	21,3	14,2	18,1	62,3	85	66,2	74,8	54,6	101,4	31,1	20	58,7	24,2
1997	33,8	17,4	22,5	12,4	55,8	35,2	39,5	96,9	9,1	19,2	24,2	29,6	31,0
1998	7,9	29,4	21,2	147,3	91	55,8	44,8	34,7	26,2	64,4	25,7	17,7	20,0
1999	29,1	16,9	32	64,3	20,3	148	39,6	44,9	94,8	86	45,8	20	25,1
2000	6,2	14,1	33,1	31,9	145,1	77,2	78,9	45,2	18,8	98,2	26	35,2	20,9

Таблица Г.5 - продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2001	23	15	56,5	76,3	57,1	57,4	122,5	44,7	52,7	76,6	22,3	14,2	29,8
2002	33,7	14,1	63,3	62,2	86,7	142,8	102,9	26	56,9	63,8	36,4	37	30,2
2003	25,3	15,2	19,9	11,2	35,1	53,7	81,6	1,2	38	59,1	42,9	20,3	26,5
2004	9,9	26,4	65	82	70,9	50,8	70,5	41,7	70,8	46,1	60,2	51,7	29,1
2005	16	7,7	32,2	111,7	57	102,5	67	91,2	19,4	38,5	45,8	4,1	30,6
2006	14,4	34,3	35,4	59,4	27,6	96,9	95	84,3	45,2	100,2	33,7	32,1	24,7
2007	5,1	17	44,5	42,3	193,1	85,7	109,6	16,2	31,2	43,3	50,4	28,6	22,9
2008	4,8	22,6	39,4	110,1	24,4	20,5	41,9	49,8	45,2	43,3	41,6	33	25,1
2009	19,3	36,7	41,4	65,2	118,6	97,2	100,7	65,9	92,7	75	50,4	31,4	31,9
2010	28,1	18,1	41,3	31,1	106,8	52,7	98,2	42,2	24,2	20,3	79,5	43,3	32,9
2011	5,2	35	22,8	26,6	53,2	119,2	41,3	69,3	20,9	58,4	64,4	25,8	31,8
2012	4	6,7	23,7	17,5	29,9	88,1	74,4	73,9	33,2	71,1	76,1	27,6	21,4
2013	27,5	32,6	44,9	26,8	99,4	40,3	83,7	141,9	38,2	87,9	46,5	33,6	39,4
2014	36,3	13,8	25,7	59,8	71,6	75,8	113,4	40,4	36,6	119,3	53,7	34,1	32,0
2015	29,4	33,4	41,2	50,6	63,8	13,7	35,6	56,8	62,6	46,8	61,2	32,1	36,9
2016	20,4	9,5	24,2	48,6	34,5	111,1	185,6	21,5	27	61,5	90,7	73,4	28,0
2017	24,4	36,2	14,7	51,8	53,9	31,9	67,4	19,8	93,5	68,1	45,2	40,4	44,0
2018	8,5	14,7	114,7	60,1	93,8	34,5	56,4	38,1	50,1	59,6	51,4	8	38,7
2019	23,5	16	9,7	77,1	62,6	157,8	68,9	54,1	40,5	53	47,3	31,8	22,0
2020	25,8	45	20,2	49,8	19,8	50,8	98,9	70,2	101,7	59,5	39,1	17,6	32,7

Таблица Г.6 – Значения среднемесячных и средних за холодный период осадков на МС Шемонаиха

Год	Среднемесячная сумма осадков												Средние за холодный период осадки
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1978	25,2	47,5	40,7	50,8	97,5	39,4	58,5	54,2	45,6	62,9	41,9	42,9	54,34
1979	33,6	27,6	14,5	42,5	26	88	52,4	32,2	10,8	27,4	79	21,1	32,1
1980	23,8	31,8	47,7	47,8	40,9	5,3	44,9	10	30,4	56,3	38,8	30,5	40,68
1981	43,5	26,6	28,4	28,3	31,4	35,3	62,1	36,7	10,9	66,6	63,7	35,9	33,56
1982	26,9	20,6	42,2	26,4	105,9	32,7	36,1	8,9	48,2	38,5	53,1	35,8	37,86
1983	17,5	0,7	41,9	22,4	31,1	70,3	89,1	28,8	41,2	42,9	119,3	31,5	29,8
1984	26,1	24,3	26	39	40,7	32,1	30,3	41,2	19,7	119,4	95,9	30,6	45,44
1985	28,8	14,2	35,2	20,9	71,3	94,9	17,8	31	35	54,9	31,7	58,5	40,94
1986	28,7	30,5	12,7	71	81,8	65,4	33,9	72,9	41,7	33,2	82,5	58,2	32,42
1987	57,3	18,1	6,2	10,8	70	9,1	65,9	46,9	22,9	30,2	23,4	42,3	44,46
1988	45,1	59,8	9,5	39,8	51,3	29,7	36,7	26,6	27,3	64,5	52,9	95,4	36,02
1989	48	75,6	37,6	27,1	42,6	2,6	111,9	63,2	13,7	35,8	53	47,5	61,9
1990	52,3	32,8	48,4	10,8	9,6	23,1	50,6	53,8	36,3	11,7	45,4	79,4	46,8
1991	45,7	28,6	11	25,9	10,7	13,4	60	67,6	55	34,6	10,1	68,5	42,02
1992	30,7	75,6	39,6	35,7	29,9	44,1	91,4	29,2	20,1	13,7	36,7	31,5	44,9
1993	25,2	18,4	23,2	36,4	40,7	31,3	63,2	57,6	47,2	37,3	88,2	40,9	27
1994	16,2	23,8	29,7	18,8	76,5	27,6	116,7	97,2	3,3	34,7	15,4	11,6	39,76
1995	25,2	22,7	10,9	22,7	39,7	29,6	45,4	29	32,5	23,7	27,4	38,3	17,16
1996	47,7	22,5	7,4	5,6	29	13	2	19,5	1,4	13,6	54,7	48	28,66
1997	15,5	41,1	7,8	77,5	67,9	32,8	33,5	27,1	14,8	51,6	24	27,7	33,42
1998	30,4	20,4	25,8	38,8	14,4	28,1	12,8	32,1	60,1	34,5	46,8	28,6	25,66
1999	36,2	20,1	27,9	9,1	59,4	81,2	57,9	19,1	13,6	61,9	64,8	55,1	31,92
2000	47,7	21,2	30,9	93,1	9,6	56,8	109	23,1	25,7	58,2	17,5	17,1	43,94

Таблица Г.6 - продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2001	35,7	22	54	27,6	92,4	102,1	113,2	15,2	21,8	23,3	39	57,5	29,26
2002	32,1	25	48	13,5	17,3	58	39,4	38,6	41,1	15,1	41,9	20,2	40,32
2003	12,7	30,2	58,7	52,4	32,1	34,5	22,6	23,8	17,1	42,7	52,9	36,4	32,74
2004	13,8	5,7	22,9	64,4	17,8	41,1	68	37,6	10,1	18,2	57,3	14,3	26,34
2005	41,1	43,3	30,3	22,6	6,4	36	50,2	75,9	19,1	77,1	29,5	39,7	37,26
2006	12,8	21,9	20,4	22,2	85,5	62,5	87,7	30,6	5	28,2	36,1	30,4	24,86
2007	10,5	15,6	35,3	22,5	6,1	13	28,9	29,6	25,8	15,7	33,5	26,4	25,58
2008	33,3	25,9	45,1	22	50,1	47,3	43,8	80,4	56,4	53,1	51,8	41,3	32,84
2009	33,6	21,1	47,2	22,5	52,7	37,2	71,9	6,4	11,4	23,9	56,1	29,1	39
2010	10,1	25,3	34,1	17,3	52,1	43,3	33,5	40,7	16,1	38,1	60	19,2	30,94
2011	7,9	3,1	43,9	9,1	9,5	47,4	107,8	38,9	26,8	55,6	82,6	46	26,82
2012	52,1	26,3	48,5	15,5	37,3	30,9	77,2	70,5	3,7	43,7	39,3	31,8	51,1
2013	34,8	27,7	15,4	37,3	35,1	26,8	72	67,8	32,4	102,3	52,7	29,2	29,8
2014	33,2	53,5	41,2	33,3	56,2	15,2	49,6	51,1	46	34,6	53,9	65,4	41,96
2015	27,8	23,5	39,1	73,9	36,8	71,1	89,4	102,7	13	71,4	87,2	48	41,94
2016	29,4	30,2	16,1	23,3	26,8	35,2	43,3	13,9	41,6	36,9	21,2	25,2	42,18
2017	6,2	23,9	58,3	56	83,3	35,7	12	51,9	45,6	66,8	51,3	18,4	26,96
2018	27,5	22,3	15,2	14,3	30,5	39	56,1	61,1	18,9	79,3	69,1	71,2	26,94
2019	47,8	43,2	20,4	9,4	3,2	20,1	68,7	48,2	50,4	55,1	34,9	28,1	50,34
2020	25,2	47,5	40,7	50,8	97,5	39,4	58,5	54,2	45,6	62,9	41,9	42,9	54,34

Таблица Г.7 – Значения среднемесячных и средних многолетних температур холодного периода на МС Лениногорск

Год	Среднемесячная температура воздуха												Средняя за холодный период температура воздуха
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1978	-10,8	-13,8	-7,2	4,2	13,1	16,8	20,5	19,3	11,5	4,9	-6,7	-5,6	-8,87
1979	-15,0	-13,5	-3,0	5,6	15,0	20,4	20,3	16,7	13,3	5,3	-4,8	-9,3	-9,79
1980	-12,0	-15,3	-10,2	4,8	13,8	20,4	21,9	17,7	13,1	6,6	-4,3	-13,4	-10,6
1981	-9,3	-13,3	-9,8	5,2	14,1	17,0	21,0	17,1	7,7	4,3	-4,2	-8,6	-9,9
1982	-12,0	-10,7	-5,7	3,9	10,7	18,0	20,6	18,0	11,1	5,0	-16,7	-16,5	-8,89
1983	-15,0	-15,9	-7,5	5,2	14,2	21,1	21,0	17,6	10,8	3,1	-0,8	-9,0	-14,4
1984	-16,4	-10,4	-6,4	7,4	12,1	16,7	20,7	18,8	12,1	6,4	-1,6	-9,8	-9,89
1985	-20,0	-16,5	-10,9	2,3	13,2	19,2	22,2	17,4	12,0	2,9	-6,5	-11,3	-13,1
1986	-10,8	-10,5	-2,2	10,9	16,3	19,3	23,6	19,1	14,4	8,2	-10,2	-14,4	-8,7
1987	-22,8	-12,0	-9,6	2,9	13,2	20,2	22,2	21,6	12,0	6,3	-7,0	-10,3	-15,3
1988	-14,0	-10,2	-14,4	4,5	15,9	17,7	23,4	19,7	12,2	6,3	-5,1	-8,5	-11,7
1989	-17,5	-11,5	-5,7	8,7	14,6	19,1	19,4	19,6	13,7	1,2	-12,1	-10,1	-11
1990	-15,5	-13,6	-4,1	5,0	17,0	19,7	18,4	20,0	11,6	5,0	-1,0	-16,4	-11,8
1991	-6,8	-5,8	-0,3	5,2	13,6	17,6	18,6	19,5	13,1	4,4	-1,0	-15,8	-6,17
1992	-13,5	-12,6	-7,9	4,1	15,5	20,1	18,8	18,6	13,7	4,8	-7,5	-10,8	-10,7
1993	-18,7	-8,5	-6,9	4,9	16,1	19,8	20,3	18,3	11,8	6,6	-3,4	-12,5	-11,8
1994	-18,6	-21,4	-2,2	6,1	14,1	19,8	21,6	19,3	12,5	6,1	-3,5	-15,5	-12,8
1995	-20,6	-12,8	-3,9	5,3	12,6	20,6	20,4	16,8	13,1	4,7	-0,8	-7,1	-12,8
1996	-9,2	-9,0	-8,0	9,8	14,0	17,5	22,0	17,5	13,2	4,3	-4,0	-10,4	-7,21
1997	-22,1	-13,6	0,8	6,4	15,3	21,0	22,9	19,1	10,9	5,5	-2,5	-14,3	-11,9
1998	-14,4	-16,5	-6,4	6,7	13,8	15,5	19,4	17,9	11,7	5,0	-5,9	-14,9	-11,4
1999	-22,1	-23,1	-7,8	2,4	11,6	19,1	18,3	18,5	12,3	5,7	0,3	-15,2	-16

Таблица Г.7 – продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2000	-25,6	-14,4	-9,4	8,4	13,3	20,3	20,1	19,1	13,6	7,1	-6,9	-15,2	-15
2001	-22,7	-24,6	-6,2	9,2	14,1	22,0	21,4	19,3	14,1	5,1	-5,6	-23,5	-16,4
2002	-11,2	-13,9	-0,8	7,2	11,7	16,6	19,7	18,5	12,1	5,5	0,4	-6,4	-11
2003	-14,0	-18,8	-3,3	7,6	12,5	19,1	19,9	18,8	10,9	4,6	-5,8	-13,4	-9,36
2004	-13,0	-11,0	-6,0	4,9	14,7	20,8	20,9	18,7	10,7	5,8	-5,2	-5,6	-10,4
2005	-18,1	-10,5	-2,3	8,7	12,7	19,7	21,2	18,2	15,5	0,3	-12,5	-8,2	-9,95
2006	-11,2	-13,0	-8,2	7,1	15,3	21,3	20,6	18,6	11,8	4,1	-3,4	-12,7	-10,7
2007	-23,1	-13,8	-3,7	5,9	10,3	20,2	19,9	18,9	11,1	5,7	-6,5	-17,8	-13,3
2008	-15,8	-14,8	-2,7	7,0	11,9	17,7	21,1	20,5	13,1	6,4	-7,8	-8,5	-12,2
2009	-11,0	-7,3	-3,7	10,4	17,2	18,3	21,2	19,6	11,7	4,1	-5,0	-15,1	-8,22
2010	-10,8	-13,8	-7,2	4,2	13,1	16,8	20,5	19,3	11,5	4,9	-6,7	-5,6	-8,87
2011	-15,0	-13,5	-3,0	5,6	15,0	20,4	20,3	16,7	13,3	5,3	-4,8	-9,3	-9,79
2012	-12,0	-15,3	-10,2	4,8	13,8	20,4	21,9	17,7	13,1	6,6	-4,3	-13,4	-10,6
2013	-9,3	-13,3	-9,8	5,2	14,1	17,0	21,0	17,1	7,7	4,3	-4,2	-8,6	-9,9
2014	-12,0	-10,7	-5,7	3,9	10,7	18,0	20,6	18,0	11,1	5,0	-16,7	-16,5	-8,89
2015	-15,0	-15,9	-7,5	5,2	14,2	21,1	21,0	17,6	10,8	3,1	-0,8	-9,0	-14,4
2016	-16,4	-10,4	-6,4	7,4	12,1	16,7	20,7	18,8	12,1	6,4	-1,6	-9,8	-9,89
2017	-20,0	-16,5	-10,9	2,3	13,2	19,2	22,2	17,4	12,0	2,9	-6,5	-11,3	-13,1
2018	-10,8	-10,5	-2,2	10,9	16,3	19,3	23,6	19,1	14,4	8,2	-10,2	-14,4	-8,7
2019	-22,8	-12,0	-9,6	2,9	13,2	20,2	22,2	21,6	12,0	6,3	-7,0	-10,3	-15,3
2020	-14,0	-10,2	-14,4	4,5	15,9	17,7	23,4	19,7	12,2	6,3	-5,1	-8,5	-11,7

Таблица Г.8 – Значения среднемесячных и средних многолетних температур холодного периода на МС Шемонаиха

Год	Среднемесячная температура воздуха												Средняя за холодный период температура воздуха
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1978	-8,8	-11,1	-3,4	2,1	10,4	13,8	17,4	16,5	9,7	4,0	-6,0	-4,7	-6,56
1979	-13,0	-10,0	-3,3	3,3	12,3	16,6	16,7	13,7	10,9	5,0	-4,8	-7,8	-8,32
1980	-10,0	-11,7	-8,4	4,3	11,0	16,3	18,9	14,4	10,7	5,6	-4,6	-9,9	-8,78
1981	-6,5	-9,7	-7,2	4,0	11,2	14,1	17,7	13,7	5,6	3,0	-3,5	-8,0	-7,38
1982	-9,3	-9,6	-5,0	2,0	8,3	14,7	17,0	14,8	8,6	3,6	-13,3	-12,1	-7,42
1983	-12,2	-13,2	-4,9	2,6	11,2	17,5	17,3	14,4	8,7	1,8	-1,6	-8,9	-11,3
1984	-13,3	-7,9	-5,0	4,9	9,5	14,0	17,6	15,9	10,0	4,4	-2,1	-8,7	-8,33
1985	-17,3	-11,5	-9,0	0,6	11,4	15,6	18,4	14,5	9,7	1,6	-8,0	-11,6	-11
1986	-9,0	-9,4	-0,5	9,6	13,3	16,5	17,8	15,4	12,3	8,0	-8,9	-11,3	-7,9
1987	-15,2	-7,9	-7,3	1,4	10,8	17,6	19,1	18,9	10,0	4,0	-6,5	-9,0	-11
1988	-11,5	-6,0	-13,0	3,1	13,7	14,7	19,5	16,8	9,5	4,9	-5,5	-7,3	-9,58
1989	-13,0	-9,1	-3,4	7,7	12,3	16,8	17,1	16,1	11,3	-1,2	-11,2	-10,5	-8,54
1990	-15,5	-10,8	-3,8	2,4	13,5	16,7	15,6	17,7	9,5	3,1	-1,6	-15,4	-11,2
1991	-5,7	-4,6	-0,7	2,9	10,8	15,1	16,1	16,6	11,1	2,5	-2,5	-12,9	-5,63
1992	-9,5	-8,8	-5,6	1,6	11,9	16,6	15,0	15,7	10,6	4,0	-7,8	-9,0	-8,14
1993	-13,6	-7,3	-6,1	3,1	12,9	15,8	17,1	15,3	9,2	3,5	-4,3	-11,5	-9,56
1994	-16,4	-18,6	-1,4	4,0	10,6	15,8	17,5	15,3	10,4	4,5	-5,0	-11,7	-11,4
1995	-16,3	-8,3	-3,2	3,3	9,9	16,5	16,4	13,7	10,9	3,1	-1,3	-7,0	-10,1
1996	-7,7	-7,2	-6,2	7,4	10,4	14,4	19,2	15,4	11,3	2,3	-4,5	-10,8	-6,18
1997	-17,6	-11,9	0,3	4,1	12,7	17,0	18,9	15,3	8,4	4,6	-2,5	-12,0	-10,3
1998	-10,8	-13,8	-3,9	5,4	11,1	11,7	16,4	14,5	9,4	3,2	-6,2	-13,1	-8,99
1999	-16,3	-18,3	-7,1	2,1	8,3	16,0	15,7	15,6	10,4	4,4	-2,1	-13,6	-12,9

Таблица Г.8 – проолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2000	-19,1	-11,8	-6,5	7,2	10,7	16,7	16,8	16,2	11,6	5,7	-6,9	-11,5	-12
2001	-19,0	-16,8	-4,3	7,5	11,4	18,6	19,0	15,9	11,6	3,6	-7,1	-19,6	-12,9
2002	-10,1	-12,5	0,1	5,9	8,5	14,0	16,3	15,7	9,7	4,3	-2,5	-6,9	-9,9
2003	-12,5	-16,6	-2,2	5,6	10,7	15,9	16,9	16,4	9,0	3,1	-6,3	-10,9	-8,9
2004	-10,4	-9,8	-4,9	6,8	14,8	20,6	21,3	19,1	11,1	7,6	-3,8	-2,9	-8,77
2005	-16,3	-8,7	-0,8	9,3	12,8	19,8	21,3	17,7	15,4	1,3	-11,2	-7,8	-8,15
2006	-9,8	-9,4	-4,5	5,7	12,4	18,0	17,8	15,8	9,3	2,4	-4,5	-10,5	-8,74
2007	-21,1	-11,1	-2,1	4,1	7,8	16,9	17,2	16,3	8,6	3,6	-8,5	-16,1	-11,7
2008	-11,5	-11,9	-0,1	5,6	9,7	14,7	18,0	17,4	10,7	4,8	-8,1	-6,4	-9,92
2009	-8,8	-6,4	-2,6	9,8	14,9	15,5	18,3	16,6	9,2	2,4	-6,5	-14,3	-6,85
2010	-8,8	-11,1	-3,4	2,1	10,4	13,8	17,4	16,5	9,7	4,0	-6,0	-4,7	-6,56
2011	-13,0	-10,0	-3,3	3,3	12,3	16,6	16,7	13,7	10,9	5,0	-4,8	-7,8	-8,32
2012	-10,0	-11,7	-8,4	4,3	11,0	16,3	18,9	14,4	10,7	5,6	-4,6	-9,9	-8,78
2013	-6,5	-9,7	-7,2	4,0	11,2	14,1	17,7	13,7	5,6	3,0	-3,5	-8,0	-7,38
2014	-9,3	-9,6	-5,0	2,0	8,3	14,7	17,0	14,8	8,6	3,6	-13,3	-12,1	-7,42
2015	-12,2	-13,2	-4,9	2,6	11,2	17,5	17,3	14,4	8,7	1,8	-1,6	-8,9	-11,3
2016	-13,3	-7,9	-5,0	4,9	9,5	14,0	17,6	15,9	10,0	4,4	-2,1	-8,7	-8,33
2017	-17,3	-11,5	-9,0	0,6	11,4	15,6	18,4	14,5	9,7	1,6	-8,0	-11,6	-11
2018	-9,0	-9,4	-0,5	9,6	13,3	16,5	17,8	15,4	12,3	8,0	-8,9	-11,3	-7,9
2019	-15,2	-7,9	-7,3	1,4	10,8	17,6	19,1	18,9	10,0	4,0	-6,5	-9,0	-11
2020	-11,5	-6,0	-13,0	3,1	13,7	14,7	19,5	16,8	9,5	4,9	-5,5	-7,3	-9,58

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

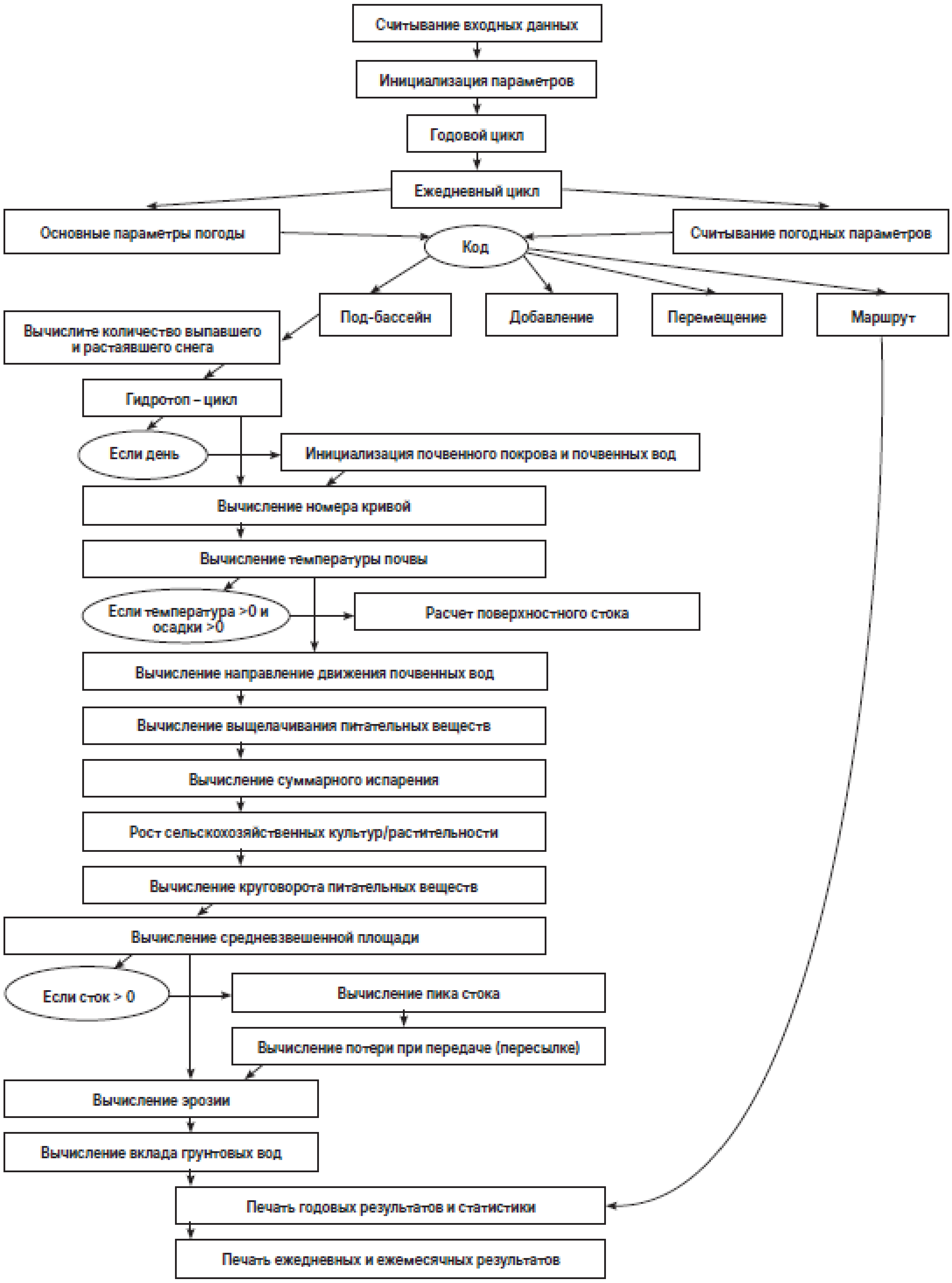


Рисунок 3.5.8. Схема расчетов в программном обеспечении SWIM.
Источник: Didovets I., Krysanova V., 2019.

Рисунок Д.1 – Схема расчетов программном обеспечении SWIM

(Источник Didovets I., Krysanova V., 2019)

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

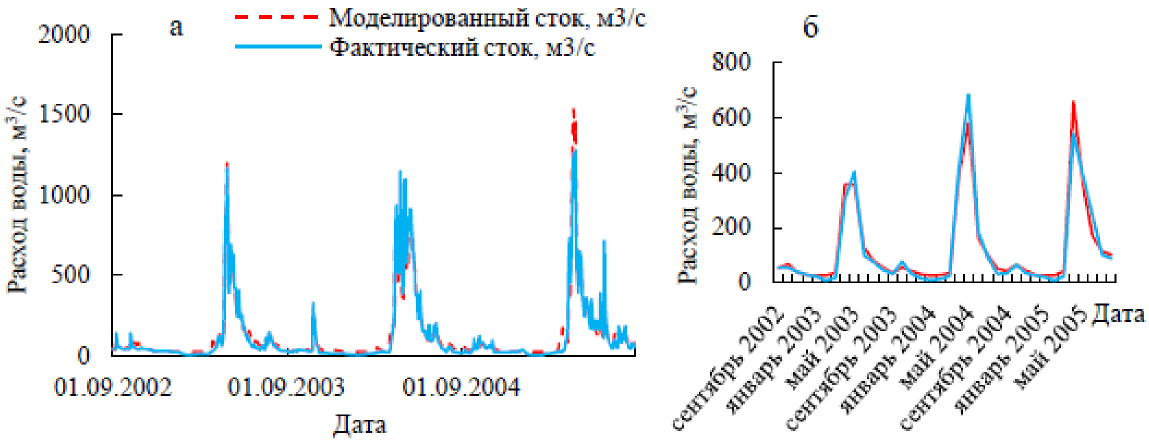


Рисунок Е.1 - Результаты калибрования среднесуточных (а) и среднемесячных расходов воды (б) р. Оба – г. Шемонаиха.

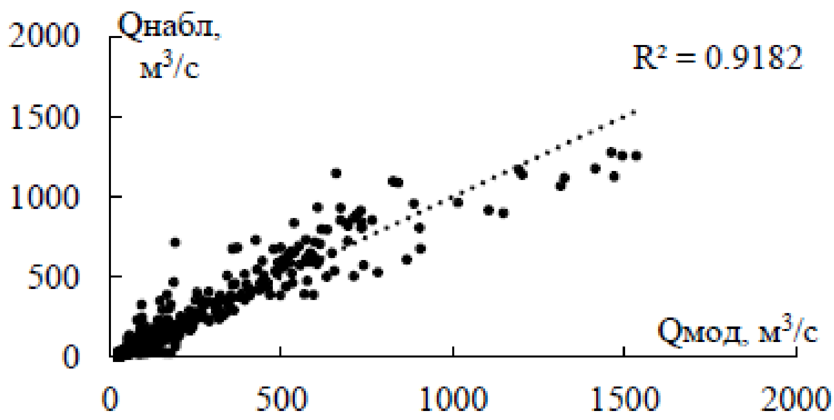


Рисунок Е.2 - Связь моделированного и фактического стока

р. Оба – г. Шемонаиха.

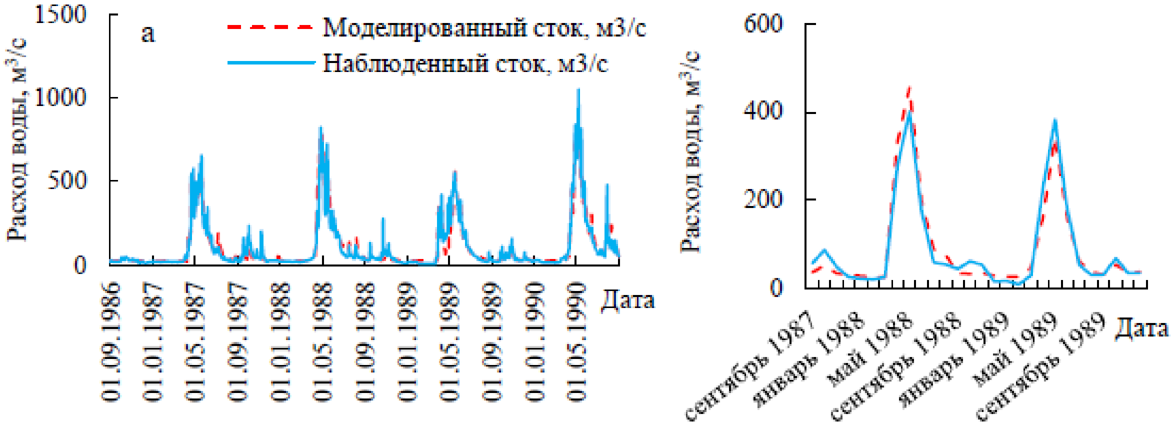


Рисунок Е.3 - Результаты калибрования (а) и среднемесячные расходы моделированного и фактического расхода воды (б) р. Ульби – с.Ульби Перевалочная.

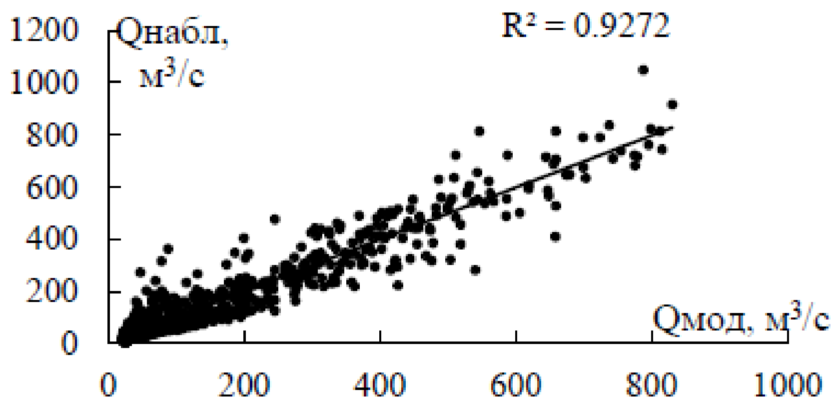


Рисунок Е.4 - Связь моделированного и фактического стока р. Ульби – с.Ульби-Перевалочная.

Таблица Е.1 - Результаты расчитанного и фактического объёма воды с заблаговременностью 3 суток.

Прогнозируемые даты (3 суток)	Рассчитанный объем, млн.м3	Фактический объем, млн.м3	Факт - Рассчитанный, млн.м3	Р, %
8-10 марта	12,1	8,3	-3,8	69
15…17 марта	12,9	13,3	0,5	104
22…24 марта	121,1	32,8	-88,3	27
29…31 марта	99,2	139,3	40,1	71
5…7 апреля	105,7	86,2	-19,5	82
12…14 апреля	185,5	127,2	-58,3	69
18…20 апреля	127,1	211,1	84,0	60
25…27 апреля	356,1	356,1	-0,1	100
2…4 мая	295,6	335,1	39,5	88
9…11 мая	116,9	140,2	23,3	83
16…18 мая	115,5	134,8	19,3	86
24…25 мая	143,0	146,7	3,7	97
30 мая…1 июня	158,8	192,6	33,8	82
6…8 июня	115,3	188,6	73,3	61
13…15 июня	145,1	157,5	12,4	92
20…22 июня	70,6	115,9	45,3	61
27…29 июня	59,9	73,2	13,2	82
4…6 июля	46,6	54,4	7,8	86
11…13 июля	30,7	26,4	-4,3	86
18…20 июля	20,8	23,6	2,9	88
25-27 июля	20,5	25,6	5,1	80
1…3 августа	17,8	16,4	-1,4	92
8…10 августа	14,9	15,1	0,2	98
15…17 августа	21,3	21,2	-0,1	99
22…24 августа	20,3	15,2	-5,1	75
29…31 августа	20,6	15,3	-5,3	74

Таблица Е.2 - Результаты расчитанного и фактического объёма воды с заблаговременностью 7 суток.

Прогнозируемые даты (7 суток)	Рассчитанный объем, млн.м3	Фактический объем, млн.м3	Факт - Рассчитанный, млн.м3	Р, %
2…9 марта	28,3	18,7	-9,6	66
9…16 марта	51,4	25,5	-25,9	50
16…23 марта	56,3	42,1	-14,2	75
23…30 марта	299,8	185,5	-114,3	62
30 марта… 6 апреля	183,5	340,5	157,0	54
6…13 апреля	380,0	337,0-	-43,0	89
13…20 апреля	609,9	495,2	-114,7	81
20…27 апреля	541,0	447,9	-93,1	83
27 апреля…4 мая	591,5	624,5	33,0	95
4…11 мая	363,7	411,7	48,0	88
11…18 мая	289,5	287,3	-2,2	99
18…25 мая	203,5	247,9	44,4	82
25 мая…1 июня	307,5	364,4	57,0	84
1…8 июня	316,7	462,7	146,0	68
8…15 июня	267,5	398,1	130,7	67
15…22 июня	96,9	175,7	78,8	55
22…29 июня	172,5	186,4	13,9	93
30 июня…6 июля	183,7	127,5	-56,2	69
6…13 июля	116,4	69,9	-46,5	60
14…20 июля	67,3	55,6	-11,7	83
21…27 июля	90,5	52,3	-38,2	58
27 июля… 3 августа	47,7	42,6	-5,1	89
3…11 августа	45,5	39,5	-6,0	87
10…17 августа	53,1	46,6	-6,5	88
17…24 августа	44,3	37,0	-7,2	84
24…31 августа	42,7	36,8	-5,9	86