

На правах рукописи

ИСМАЙЛОВА ИРИНА ГАБИЛОВНА

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА
РЕЧНОГО БАССЕЙНА В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ
КЛИМАТА**

2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Научный руководитель: **Раткович Лев Данилович,**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

Официальные оппоненты: **Фролов Анатолий Васильевич,**
доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории глобальной гидрологии ФГБУН ИВП РАН.

Коронкевич Николай Иванович,
доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии ФГБУН Института географии РАН.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ).

Защита диссертации состоится «11» марта 2025 г. в 12.30 на заседании диссертационного совета 35.2.030.07 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, учебный корпус №28, аудитория 201, тел: 8(499)976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 года

Ученый секретарь
Диссертационного совета 35.2.030.07
кандидат технических наук, доцент

Н.Б. Мартынова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследования водного баланса речного бассейна являются основой для количественного и качественного определения водных ресурсов, их изменения в зависимости от природно-климатических и антропогенных факторов, прогнозирования притока воды в замыкающем створе. Одновременно создаются гидрологические основы управления водными ресурсами речных водосборов на долгосрочную и среднесрочную перспективу.

В начале XXI века значительно возрос интерес к водным проблемам как со стороны различных отраслей развивающейся экономики, так и возрастающим беспокойством об охране источников пресной воды.

В настоящее время динамико-стохастический подход к анализу данных гидрометеорологических наблюдений за формированием речного стока является одним из наиболее эффективных методов предвидения его изменения как в ближайшей, так и в отдаленной перспективе с целью гидрологического обоснования вариантов управления природными режимами водных объектов. Таким образом, и для XXI века одной из фундаментальных и актуальных задач гидрологии суши по-прежнему является совершенствование методов определения элементов водного баланса (далее ЭВБ) речных бассейнов.

Цель и задачи исследований. Целью исследований является совершенствование методов оценки взаимосвязи и межгодовых колебаний ЭВБ речного бассейна и разработка методики прогноза притока речных вод на ближайшую и отдаленную перспективу (на примере р. Волги) с учетом вероятной динамики процессов и возможных сценариев изменения климата. Информационной базой исследований является накопленная гидрометеорологическая информация за период XX и начало XXI века. Для достижения поставленной цели выполнены следующие задачи:

1. Анализ современного состояния воднобалансовых исследований;
2. Разработка информационно-аналитической системы (базы данных) гидрометеорологических характеристик водосбора р. Волги.
3. Совершенствование методов оценки межгодовой и сезонной изменчивости ЭВБ в условиях нестационарности их формирования.
4. Ретроспективный сравнительный анализ ЭВБ бассейна Волги в зоне формирования у г. Волгограда.
5. Анализ вероятных сценариев изменения глобального и регионального климата в XXI веке применительно к бассейну Волги.
6. Определение параметров уравнений, связывающих сток Волги в створе Волгограда с ЭВБ.
7. Оценка и учет нестационарности в многолетних колебаниях речного стока.
8. Прогнозирование стока Волги в створе Волгограда с учетом возможных сценариев изменения климата.

Научная новизна исследований

1. Предложена методика комплексной оценки ЭВБ на основе анализа их межгодовой и сезонной изменчивости и с учетом нестационарности климата.

2. Создана информационно-аналитическая база данных для оценки притока к замыкающему створу бассейна реки Волги у Волгограда на фоне возможных сценариев изменений климата и развития экономики в этом регионе России.

3. Установлены устойчивые тренды в многолетних колебаниях сезонного и годового притока к створу Волгограда, в динамике среднемноголетнего испарения с поверхности водосборов, в температурном режиме приземного слоя воздуха.

4. Установлена роль бассейновых влагозапасов в развитии гидрологических процессов в бассейне Волги, определены пороговые значения участия атмосферных осадков в формировании речного стока и суммарного испарения.

5. Выполнен прогноз изменения нормы притока Волги к Волгоградскому гидроузлу для уровней 2011-2030 и 2041-2060 годов для сценариев SRESA2, SRESA1B, SRESB1 (CMIP3) и для сценариев RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (CMIP5).

6. Реализован метод тенденций в сочетании с динамико-стохастическим подходом, что позволило оценить изменение статистических параметров речного стока Волги в створе Волгоградского гидроузла и построить прогнозные кривые обеспеченности для близкой и отдаленной перспективы до 2050 года.

Объект и предмет исследования. В качестве объекта исследования в диссертации рассмотрен бассейн реки Волги. Предметом исследования являются закономерности формирования элементов водного баланса в этом бассейне. Используются методы математической статистики, инструменты корреляционного и регрессионного анализа.

Материалы и методы исследований.

В основе исследований лежат теоретические научные положения о динамико-стохастической природе изменения ЭВБ речной системы, что позволило применить инструменты корреляционного и регрессионного анализа, в том числе подходы, разработанные автором для оценки ЭВБ природных комплексов. Предлагаемые методы анализа водного баланса речного бассейна базируются на теоретических положениях, разработанных в лаборатории моделирования поверхностных вод Института водных проблем РАН (г. Москвы).

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Методика моделирования водного баланса, лежащая в основе прогноза сезонной и межгодовой изменчивости показателей водного режима в зоне формирования стока реки Волги в соответствии с возможными сценариями изменения климата.

2. Уравнения притока речных вод к створу Волгограда в зависимости от фактора времени и показателей климата.

3. Прогноз статистических параметров притока Волги к Волгоградскому гидроузлу методом тенденций в сочетании с динамико-стохастической моделью при различных сценариях эмиссии парниковых газов в атмосфере.

4. Результаты исследований по сценариям возможного изменения глобального и регионального климата на основе ансамбля из 16 моделей общей

циркуляции атмосферы «МОЦАО» нового поколения CMIP3 и CMIP5, адаптированных к бассейну реки Волга и учитывающих меняющиеся условия климата и хозяйственной деятельности в XXI веке.

5. Долгосрочные прогнозы основных гидрологических характеристик годового и сезонного притока Волги к Волгограду на уровне близкой (2030 г.) и долгосрочной (2050 г.) перспективы. Представлены прогнозные кривые обеспеченности, соответствующие сценариям изменения климата.

Личный вклад соискателя. Проведение теоретических и практических исследований по усовершенствованию оценки (прогноза) ЭВБ речного бассейна применительно к бассейну реки Волги. Разработка методики оценки трудноизмеримых ЭВБ бассейна реки – общего испарения с поверхности водосборов и изменения бассейновых влагозапасов. Разработана электронная база данных гидрометеорологических показателей бассейна Волги, проведены комплексные компьютерные исследования по определению ЭВБ этого бассейна. Предложены системы уравнений для анализа трудно измеряемых ЭВБ и построения прогнозных кривых обеспеченности речного стока в замыкающем створе речного бассейна.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что они применимы для решения проблем современного и перспективного водообеспечения, разработки мероприятий по охране окружающей среды. Результаты диссертационной работы могут эффективно использоваться в Схемах комплексного использования и охраны водных объектов речных бассейнов, в том числе СКИОВО р. Волги, а также при разработке правил управления Волжско-Камского каскада водохранилищ (Росводресурсы, ПАО «РусГидро»). По результатам исследований получено свидетельство интеллектуальной собственности № RU 2024620214.

Степень достоверности и апробации результатов. Обоснованность полученных результатов обеспечивается применением современных математических методов, преимуществом теоретических подходов, надежностью исходной информации. Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и зарубежных конференциях и семинарах (устные и стендовые доклады): 1) Международная Летняя школа на тему «Интеграция аграрной науки в мировое образовательное пространство» ЮКУ им. М. Ауэзова, 03-14 июня, 2024 года (г. Шымкент, Республика Казахстан); 2) VI Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства», посвященном 120-летию со дня рождения А.В. Михайлова 24 мая 2023 г., НИУ МГСУ (Россия, г. Москва, 2023); 3) XII Международный конкурс научно-исследовательских работ «Фундаментальные и прикладные аспекты развития современной науки» 27 марта 2023г. (Россия, г. Уфа, 2023); 4) X Международная конференция (Россия, г. Саратов, 2023); 5) IX Международная конференция (Россия, г. Саратов, 2022); 6) II Всероссийская научная конференция «Наука, технологии, общество – НТО-II-2022», Красноярский дом науки и техники (Россия, г. Красноярск, 2022); 7) XXVI Международная научно-практическая

конференция «Наука России: Цели и задачи» (Россия, г. Екатеринбург, 2021); 8) XXVII Международная научно-практическая конференция «Наука России: Цели и задачи» (Россия, г. Екатеринбург, 2021); 9) IX Всероссийская конференция (Россия, г. Ростов-на-Дону, 2021); 10) Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность» (Россия, г. Севастополь, 2021).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, из них 10 в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертация включает в себя четыре главы, введение, заключение, список литературы и приложение, изложена на 197 страницах. В тексте содержится 24 рисунка и 38 таблиц. Библиографический список состоит из 176 источников, в том числе 11 иностранных изданий.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы исследования, степень ее разработанности, сформулированы цели и основные задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Сформулированы положения, выносимые на защиту, обоснована степень достоверности, отмечена публикационная активность соискателя и перечислены факты участия в научно-технических форумах и конференциях.

В первой главе приведен подробный анализ развития водно-балансовых исследований в России и за рубежом. Рассматриваются особенности формирования ЭВБ речных бассейнов, определяющих развитие речного стока в изменяющихся природных и антропогенных условиях. Концептуальная схема исследования основывается на анализе существующих знаний о гидрометеорологических процессах в речном бассейне. Установленные результаты анализа ЭВБ и результаты водного баланса являются основой для количественного определения водных ресурсов и их изменения в зависимости от природных факторов и деятельности человека. Водно-балансовые исследования формировались ещё советской научной школой и заложены в трудах основоположников гидрологии суши и инженерной гидрологии, их соратников и последователей Алексеевского Н.И., Бабкина В.И., Бефани Н.Ф., Болгова М.В., Булавко А.Г., Вуглинского В.С., Гельфана А.Н., Георгиевского Ю.М., Данилова-Данильяна В.И., Добровольского С.Г., Исмайылова Г.Х., Коронкевича Н.И., Крицкого С.Н. и Менкеля М.Ф., Кучмента Л.С., Львовича М.И., Плиткина Г.А., Ратковича Д.Я., Ратковича Л.Д., Рождественского А.В., Фролова А.В., Фроловой Н.Л., Шикломанова И.А. и других ученых. Центральной темой диссертации являются анализ структуры и генетические основы формирования элементов водного баланса речного бассейна. Поэтому основные усилия в ходе исследований были направлены на разработку наиболее целесообразных методических подходов количественного определения основных составляющих ЭВБ. Наиболее точно измеряемым исходным материалом для расчета ЭВБ речных бассейнов за многолетний период являются осадки и особенно речной сток. Оценка других элементов, таких как суммарное испарение с

поверхности речного водосбора и бассейновые влагозапасы, является самой сложной задачей. Наибольшие пополнения бассейновых влагозапасов происходят в период половодья, а сработка – в период межени. Формирование ЭВБ речного бассейна в значительной степени зависит не только от естественных, но и от антропогенных факторов.

В диссертации обоснована необходимость совершенствования методики водного баланса речного бассейна в части определения суммарного испарения, бассейновых влагозапасов, прогнозирования притока речных вод к замыкающим створам.

Во второй главе описана модель формирования ЭВБ речного бассейна, которая позволяет моделировать такие трудноизмеримые составляющие как суммарное испарение с поверхности речного водосбора и изменение бассейновых влагозапасов. Разработан алгоритм определения годового и сезонного (половодье и межень) суммарного испарения и изменения бассейновых влагозапасов. Анализируются сценарии возможного изменения климата и его влияния на ЭВБ бассейна реки Волги. Описывается структура модели, приводятся основные уравнения, по которым производится расчет испарения и изменения бассейновых влагозапасов при наличии длительных временных рядов речного стока и атмосферных осадков.

Четырехчленное уравнение водного баланса речного бассейна включает атмосферные осадки (P), речной сток (R), суммарное испарение (E) и изменение бассейновых влагозапасов ($\pm\Delta V$). Непосредственно оценить суммарное испарение и бассейновые влагозапасы, как в годовом, так и в многолетнем разрезе, невозможно, в особенности для средних и крупных водосборов. Кроме того, бассейновые влагозапасы, как и атмосферные осадки, участвуют в формировании речного стока и суммарного испарения. Наиболее достоверно определяемым ЭВБ речного бассейна, независимо от его размера, является речной сток. Вторым элементом ЭВБ речного бассейна, который определяется инструментальными наблюдениями, являются атмосферные осадки. Решается задача определения суммарного испарения и бассейновых влагозапасов при заданных значениях атмосферных осадков и речного стока, опирающихся на стандартную информацию, полученную на государственных и ведомственных опорных пунктах наблюдений. Предлагаемые нами методы анализа водного баланса опираются на теоретические положения, разработанные ИВП РАН в лаборатории моделирования поверхностных вод.

Для оценки суммарного испарения и изменения бассейновых влагозапасов применена методика, основанная с одной стороны на генетических свойствах ЭВБ, с другой стороны учитывает их вероятностную природу. Исходя из традиционного уравнения водного баланса речного бассейна, получаем выражение:

$$P_i + \Delta V_i = R_i + E_i \rightarrow P_i - R_i = E_i - \Delta V_i \quad (1)$$

где P_i , ΔV_i , R_i , E_i – соответственно годовые осадки, изменение бассейновых влагозапасов, сток и испарение. Таким образом разность осадков и стока дает величину испарения, «преуменьшенную» в случае сработки бассейновых влагозапасов ($+\Delta V_i$) и «преувеличенную» при накоплении ($-\Delta V_i$).

Задача состоит в том, чтобы раскрыть это уравнение на основании стохастических связей между элементами водного баланса. Принимая осадки за первичный процесс, несложно заметить, что в среднем за многолетие, когда изменение влагозапасов стремится к нулю, осадки распределяются между стоком и испарением. При этом влагозапасы формируются и как составляющая стока, так и испарения, как это показано ниже.

По известным P_i и R_i можно определить ΔV_{iR} - изменение бассейновых влагозапасов, участвующих в формировании стока года (влагозапасов по стоку).

$$\Delta V_{iR} = \pm(R_i - R_{i0}) \quad (2)$$

Аналогично, определяем функцию изменения влагозапасов по испарению

$$\Delta V_{iE} = \pm(E_i - E_{i0}) \quad (3)$$

Уравнение водного баланса при этом принимает следующую форму

$$P_i + \Delta V_{iR} + \Delta V_{iE} = R_i + E_i \quad (4)$$

$$\Delta V_i = \Delta V_{iR} + \Delta V_{iE} \quad (5)$$

Как видно из уравнений, бассейновые влагозапасы разделяются по степени их участия в формировании стока и испарения

$$R_{i0} = k_{Rcp} \cdot P_i; E_{i0} = (1 - k_{Rcp}) \cdot P_i \quad (6)$$

k_{Rcp} – среднеемноголетний коэффициент годового стока, показывающий связь равнообеспеченных значений стока и осадков.

При преобладании стока над испарением ($k_R > 0,5$) «испаряется» то, что не успело «стечь», а при ($k_R < 0,5$) – «стекает» то, что не успело «испариться». Для оценки изменения влагозапасов по испарению $[\Delta V_{iE}]$ устанавливаются эмпирические зависимости, связывающих данную характеристику с определяющими его метеорологическими факторами $[\Delta V_{iE}] = f\{P_i, R_i, [\Delta V_{iR}]\}$ для речного бассейна, по которому имеются данные обо всех ЭВБ за многолетний период, такие как, $P_i, R_i, E_i, \Delta V_i$.

Далее в соответствии с эмпирически установленными для исследуемого бассейна значениями k_{Rcp} определяются ежегодные значения $[\Delta V_{iE}]$ и $[\Delta V_{iR}]$, их статистические параметры (среднее и стандартное отклонение), а также коэффициент взаимной корреляции. Учитывая факт неустойчивости равновесного состояния влагозапасов в реальных условиях, достаточно сложно определить такие зависимости напрямую. Поэтому была принята гипотеза о существовании «глобального» состояния равновесия гидрологической системы речного бассейна. В этом состоянии осадки равномерно участвуют в формировании стока и испарения, поэтому k_{Rcp} можно принять равным 0,5. Соответственно смыслу методики формируются уравнения регрессии:

$$[\Delta V_{iE}] = a\Delta[\Delta V_{iR}] + b \Delta P_i + [\Delta V_{iR}]_{cp} \quad (7)$$

В результате реализации описанной методики для ряда бассейнов в зоне действия водно-балансовых станций получены статистические характеристики (8) для определения коэффициентов регрессии.

$$r([\Delta V_E], P), r([\Delta V_E], R), r([\Delta V_E], [\Delta V_R]), \sigma([\Delta V_E]), \sigma([\Delta V_R]), \sigma(R), \sigma(P) \quad (8)$$

Используя уравнение регрессии (7), определяем ежегодное испарение по известным значениям стока

$$[E_i] = (1 - k_{R_{cp}}) \cdot P_i + [\Delta V_{iE}], \quad (9)$$

в первом приближении $[E_i] = 0,5 \cdot P_i + [\Delta V_{iE}]$ (10)

Далее вычисляются выборочные оценки основных статистических параметров (среднее, стандарт, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии и коэффициент автокорреляции), которые затем сопоставляются с аналогичными параметрами наблюдаемых значений испарения E_i .

Правильность расчетов испарения оценивается по критерию согласия η^2

$$\eta_{\text{расч/набл}}^2 = 1 - \frac{\varepsilon_{\text{ост}}^2}{\sigma_E^2} = R_{\text{расч/набл}}^2 \quad (11)$$

который равен коэффициенту детерминации

где: $\varepsilon_{\text{ост}}^2$ – отклонение расчетного испарения от наблюдаемого,

σ_E^2 – среднеквадратическое отклонение наблюдаемого испарения.

Наиболее высокие значения коэффициента согласия позволяют уточнить для конкретного бассейна коэффициент $k_{R_{cp}}$. Для проверки достоверности результирующего уравнения регрессии использовались результаты исследований, проведенных на сети воднобалансовых станций, данные по водному балансу для водосборов Валдайской станции ГГИ, для ряда пунктов междуречья реки Волги, Оби и реки Хиджи (Япония), а также использованы данные, опубликованные в научно-прикладном справочнике под редакцией М.Л. Маркова.

По частным водосборам были определены годовые величины изменения влагозапасов по стоку и испарению, статистические параметры временных рядов ЭВБ и коэффициенты взаимной корреляции, включая коэффициенты корреляции изменения влагозапасов по испарению с осадками, стоком и изменением влагозапасов по стоку. Результаты расчетов показали, что полученные значения критерия η были достаточно высокими ($\eta \geq 0,83$).

Принимая во внимание стохастическую зависимость ЭВБ, развитие методики связано с корреляционным уравнением речного стока на основе Марковского процесса:

$$R_i = R_{i,cp} + r(1) \cdot \frac{\sigma_i}{\sigma_{i-1}} \cdot (R_{i-1} - R_{i-1,cp}) \quad (12)$$

Для выборок достаточной длины уравнение (12) принимает вид

$$[R_i] = r(1) \cdot R_{i-1} + R_{i,cp} \cdot (1 - r(1)) \quad (13)$$

Составляющие правой части уравнения (13) можно рассматривать как динамичную или детерминированную составляющую стока текущего года, которая формируется за счет аккумуляции осадков прошлого года и их сработки в следующем году.

Совмещением генетического и динамико - стохастического подходов получены уравнения и зависимости, связывающие влагозапасы с осадками и стоком:

$$\Delta V_i^{(1)} = P_{\text{сраб},i} - P_{\text{AK},i} = r(1) \cdot (R_{i-1} - R_i) \quad (14)$$

Объем воды i -го года, можно разделить на две составляющие. Первая – сработка трансформированных осадков прошлого года $P_{сраб,i}$, а вторая – текущего года за вычетом трансформации.

Изменение бассейновых влагозапасов тоже имеет две составляющие:

$$\Delta V_i = \Delta V_i^{(1)} + \Delta V_i^{(2)} = r(1) \cdot (R_{i-1} - R_i) + [\Delta V_{iR,T}] + [\Delta V_{iE,T}] \quad (15)$$

Изложенная методика позволила получить численные реализации корреляционных зависимостей для оценки многолетних рядов испарения, используя информацию водно-балансовых станций в бассейнах рек Полометь и Хиджи, а также метеостанции г. Оренбурга. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики временных рядов расчетного и фактического испарения, которые показывают достаточно высокий уровень совпадения.

Таблица 1 – Статистические параметры временных рядов расчетного $[E_i]$ и фактического E_i годового испарения

Параметры	Полометь (n= 30 лет)		Хиджи (n= 40 лет)		Оренбург (n =35 лет)	
	$[E_i]$	E_i	$[E_i]$	E_i	$[E_i]$	E_i
M	520	525	574	570	387	389
σ	47	46	18	20	60	65
C_v	0,1	0,1	0,05	0,05	0,17	0,18
A	145	150	65	70	225	240
R_{EP}	0,85	0,80	0,90	0,85	0,90	0,94
$r(1)$	0,25	0,30	0,15	0,20	0,30	0,33
η	0,83	-	0,87	-	0,93	-

В таблице 1 приведены параметры M – математическое ожидание, σ – среднеквадратическое отклонение, C_v – коэффициент вариации, A – амплитуда, R_{EP} – коэффициент взаимной корреляции испарения и осадков, $r(1)$ – коэффициент корреляции смежных лет со сдвигом на 1 год, η – критерий степени согласия.

Методика позволяет замкнуть систему уравнений и разработать алгоритмы определения в многолетнем периоде суммарного испарения речных водосборов и бассейновых влагозапасов при заданных временных рядах суммарных осадков и притока речных вод к замыкающему створу. Применительно к описанной методике сформулирована последовательность расчетов в виде алгоритма расчета годового и сезонного испарения с поверхности суши речного бассейна и бассейновых влагозапасов в условиях нестационарности формирования ЭВБ (свидетельство на базу данных).

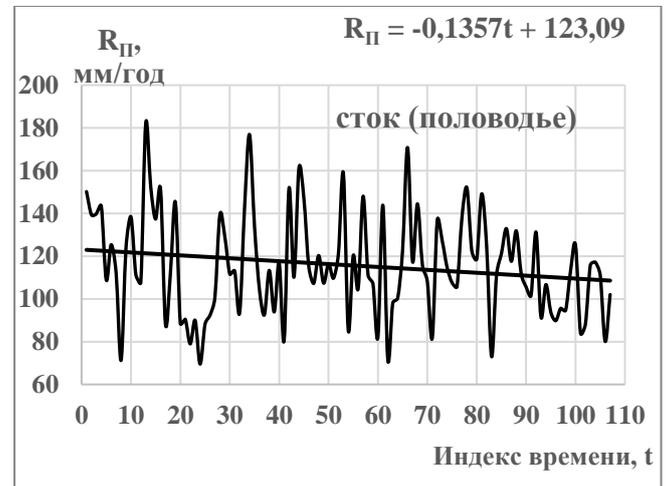
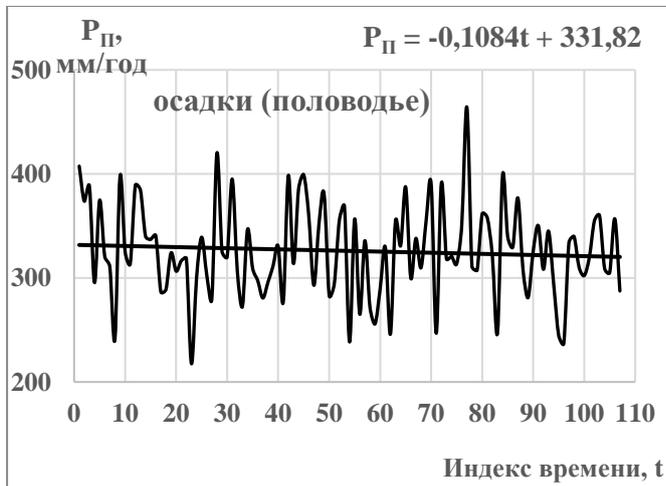
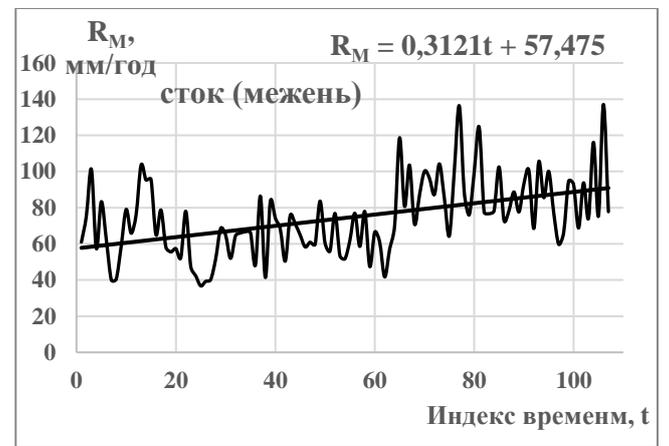
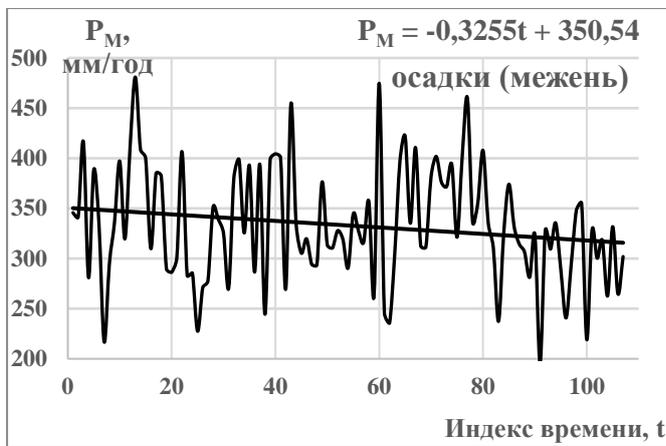
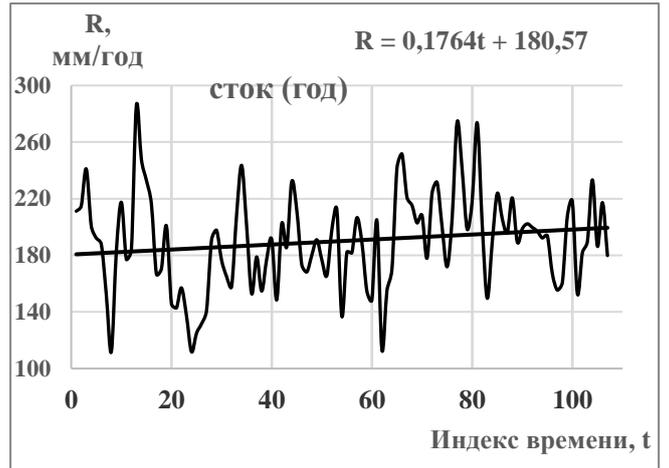


В работе в качестве объекта исследования рассмотрен бассейн реки Волги в зоне формирования у Волгограда рисунок 1. В этом отношении бассейн реки Волги может выступать как модель природного комплекса для анализа и оценки межгодовой и сезонной изменчивости и взаимосвязи ЭВБ речного бассейна, так как изменение природно-хозяйственных условий, особенно глобального и регионального климата возможно приведут, а может уже привели к изменению гидрологических характеристик этого бассейна.

Рисунок 1 – Бассейн реки Волги

В последнем разделе главы выполнен анализ сценариев возможного изменения климата и его влияние на ЭВБ бассейна реки Волги. Проанализирована возможность использования климатических сценариев будущего по наиболее поздним версиям «МОЦАО».

В третьей главе исследованы закономерности многолетних и внутригодовых колебаний ЭВБ, выполнена верификация уравнений связи годового и сезонного стока реки Волги, сделана оценка стационарности и однородности ЭВБ бассейна Волги. Ретроспективный анализ закономерностей многолетних и внутригодовых колебаний ЭВБ бассейна Волги свидетельствует об определенных закономерностях колебаний годовых и сезонных составляющих водного баланса. Для рек бассейна Волги характерно высокое половодье, которое приходится на начало апреля за счет таяния зимнего снега, накопившегося с ноября по март месяц. Твердые осадки выпадают на поверхность в период с ноября по декабрь текущего года и январь, февраль и март следующего года, вступая в гидрологический цикл с запаздыванием на 4-5 месяцев. В многолетних колебаниях годовых и сезонных составляющих водного баланса наблюдается свойственное всем гидрометеорологическим характеристикам чередование маловодных и многоводных лет и их групп, представленных на рисунке 2.



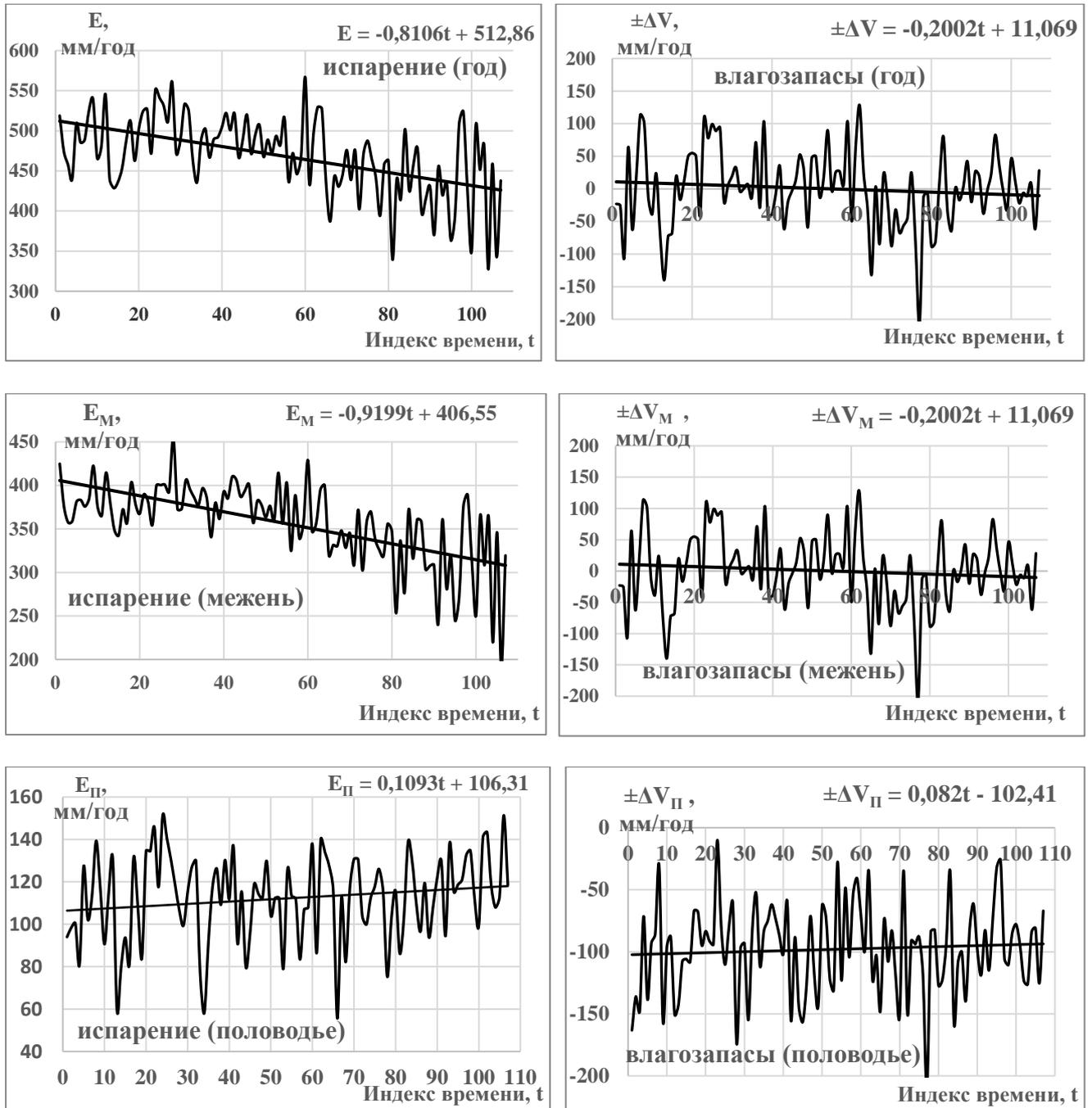


Рисунок 2 – Многолетние и сезонные колебания ЭВБ бассейна р. Волги за период 1914/1915 – 2020/2021 годов; t – индекс (номер) года в многолетнем ряде наблюдений.

В многолетних колебаниях стока выделяются длительный маловодный период пониженного годового стока р. Волги, 1930-1946 гг. – катастрофически маловодный, характеризуется снижением стока до $218 \text{ км}^3/\text{год}$ и второй интервал 1946-1978 – умеренно маловодный, характеризуется снижением стока до $252 \text{ км}^3/\text{год}$, при современной норме годового стока $257 \text{ км}^3/\text{год}$. Как видно из графиков эти периоды характеризуются пониженными осадками и сопровождаются увеличением суммарного испарения. Таким образом, рассмотренный нами период включает в себя полный цикл колебаний годовых ЭВБ бассейна р. Волги.

Проведенный сравнительный анализ изменчивости ЭВБ бассейна реки Волги позволил сделать вывод о том, что наиболее вероятной причиной возникновения маловодья в данном регионе является такое соотношение температуры и влаги, при котором пониженные атмосферные осадки согласуются с повышенными значениями общего испарения с поверхности водосборов. При этом периоды повышенной водности соответствуют периодам повышенных осадков и пониженных значений испарения. Наоборот, периоды пониженной водности соответствуют периодам пониженных осадков и повышенных значений испарения.

Во второй части третьей главы представлены результаты верификации уравнений связи годового и сезонного стока реки Волги с определяющими его природными (климатическими) показателями. В результате статистического анализа взаимосвязей между элементами водного баланса за расчетный период получены уравнения следующего вида, которые позволили оценить приток Волги к Волгоградскому гидроузлу. Из рассмотренных связей ниже показаны уравнения с наибольшими коэффициентами корреляции R .

Год в целом (базовый период – 1914/1915 – 2020/2021 гг., n=107 лет)

Годовой сток, как функция осадков и испарения

$$R_{\Gamma}=0,300 P_{\Gamma} - 0,538 E_{\Gamma} + 244,31, \quad R = 0,93; R^2 = 0,87 \quad (16)$$

Годовой сток, как функция осадков, испарения и температуры испаряющей поверхности

$$R_{\Gamma}=0,285 P_{\Gamma} - 0,471 E_{\Gamma} - 8,489 T_{\Gamma}^* + 253,62, \quad R = 0,94; R^2 = 0,89 \quad (17)$$

Половодье

Сток половодья, как функция осадков и испарения

$$R_{\text{В}}=0,186 P_{\text{В}} - 1,057 E_{\text{В}} + 173,74, \quad R = 0,99; R^2 = 0,98 \quad (18)$$

Межень

Сток межени, как функция осадков и испарения

$$R_{\text{М}}=0,233 P_{\text{М}} - 0,401 E_{\text{М}} + 139,66, \quad R = 0,94; R^2 = 0,89 \quad (19)$$

Сток межени, как функция осадков, испарения и температуры

$$R_{\text{М}}=0,233 P_{\text{М}} - 0,401 E_{\text{М}} - 0,031 T_{\text{Т}} + 140,09, \quad R = 0,88; R^2 = 0,78 \quad (20)$$

Год в целом (базовый период – 1901/1902 – 2020/2021 гг., n=120 лет)

Годовой сток, как функция осадков и испарения

$$R_{\Gamma}=0,4117 P_{\Gamma} - 0,5889 E_{\Gamma} + 195,78, \quad R = 1,0; R^2 = 1,0 \quad (21)$$

Годовой сток, как функция эффективных осадков и температуры испаряющей поверхности

$$R_{\Gamma}=0,4054 (P_{\Gamma} - E_{\Gamma}) - 6,4378 T_{\Gamma}^* + 135,8 \quad R = 0,97; R^2 = 0,95 \quad (22)$$

Анализ многолетних колебаний атмосферных осадков за год (XI-X), период половодья (IV-VI) и период межени (летне-осенний и зимний) (VII-III) показывают отсутствие сколько-нибудь явных трендов в их динамике, однако рассмотрение разностных интегральных кривых атмосферных осадков позволяет выделить характерные периоды в их колебаниях.

В четвертой главе выполнен прогноз речного стока реки Волги в створе Волгограда в XXI веке. В общей постановке гидрологический процесс может быть представлен моделью, воспроизводящей зависимость параметров распределения вероятностей процесса от времени. В этом случае вероятностное описание процесса отражает его динамико-стохастическую природу, когда детерминированная составляющая получает привязку ко времени, а стохастическая рассматривается как некоторое случайное отклонение от математического ожидания в каждый момент времени. При этом само математическое ожидание является детерминированной функцией времени. В частности, авторегрессия первого порядка между объемами стока смежных интервалов времени может быть описана с помощью уравнения (Крицкий С.Н., Менкель М.Ф., Сванидзе Г.Г., 1977) для распределения Пирсона III типа

$$k_{i+1}(k_i) = 1 + r(k_i - 1) + \Phi_{i+1} C_v \sqrt{1 - r^2} \quad (23)$$

Величины Φ_{i+1} определяются в зависимости от условного коэффициента асимметрии по таблице Фостера - Рыбкина, либо с помощью встроенных статистических функций Excel.

Приведение нестационарного гидрологического процесса $W(t)$ к стационарным условиям $U(t)$ в предположении, что математическое ожидание m и стандартное отклонение σ являются функциями времени может быть выполнено путем стандартного преобразования по формуле

$$U(t) = \frac{W(t) - m(t)}{\sigma(t)} \quad (24)$$

Функция $U(t)$ характеризует процесс с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной единице. Для описания данной функции переходим от календарного представления хода процесса к его вероятностной характеристике, т.е. $U(t) \rightarrow U(p)$. Обратный переход к нестандартным условиям, учитывающим временную изменчивость притока речных вод и их флуктуационную структуру, может быть осуществлен по выражению

$$W(t, p) = m(t) + U(p)\sigma(t) \quad (25)$$

Второе слагаемое $U(p)\sigma(t)$ является отклонением величины стока $W(t)$ в каждый конкретный момент времени t от его среднемноголетней водности. Запишем уравнение (25) в виде формулы

$$W(t, p) = m(t) + \Delta W(p) \quad (26)$$

Таким образом учет и вероятностная оценка нестационарного притока речных вод сводится к решению двух задач: определения условий изменения во времени детерминированной составляющей $m(t)$ и установления характера колебаний случайной составляющей $\Delta W(p)$.

Во второй части четвертой главы проводится прогноз изменения среднемноголетнего стока Волги в исследуемом створе на основе вероятностно-статистического подхода. Располагая длительными, более 100 лет, рядами гидрологических наблюдений, прогнозируем величину среднего стока через 30 и

50 лет. Принимая гипотезу о сохранении трендов в начале XXI века, можно предположить, что на уровне 2030 г. норма стока Волги в исследуемом створе составит 262 км³/год, что соответствует динамике прироста среднего стока Волги примерно 0,5 км³/год. На уровне 2050 г. норма стока составит при таком прогнозе 265 км³/год.

В третьей части главы выполнен прогноз среднемноголетнего стока р. Волги в створе Волгограда на основе связи речного стока с климатическими показателями в соответствии со сценариями общей модели циркуляции атмосферы «МОЦАО» в диапазоне версий СМIP3 и более поздних версий пятого поколения СМIP5. Для разных сценариев версий МОЦАО проведены массовые исследования, результаты которых сведены в таблицы 2 и 3.

Таблица 2 – Среднемноголетние значения стока Волги у Волгограда по различным сценариям и по версиям СМIP3.

Уравнения Сценарий	Версия 1									
	Период 2011 – 2030 годы					Период 2041 – 2060 годы				
	16	17	21	22	Сред.	16	17	21	22	Сред.
SRES A2	195	190	203	194	196	199	181	209	191	195
SRES A1B	194	187	201	192	194	202	181	213	193	197
SRES B1	195	188	203	193	195	198	183	207	192	195
Среднее	195	188	202	193	195	200	182	210	192	196
	Версия 2									
SRES A2	183	178	190	186	184	179	161	188	176	176
SRESA1B	184	178	191	184	184	180	160	191	178	177
SRESB1	182	175	190	184	183	180	166	188	178	178
Среднее	183	177	190	185	184	180	162	189	177	177

Таблица 3 – Среднемноголетние значения стока Волги у Волгограда по различным сценариям и по версиям СМIP5.

Уравнения Сценарий	Версия 1									
	Период 2011 – 2030 годов					Период 2041 – 2060 годов				
	16	17	21	22	Сред.	16	17	21	22	Сред.
RCP2.6	195	186	203	192	194	201	186	212	196	199
RCP4.5	195	186	203	192	194	202	182	213	194	198
RCP8.5	197	187	205	194	196	203	177	215	191	196
Среднее	196	186	204	193	195	202	182	213	194	198
	Версия 2									
RCP2.6	182	172	189	181	181	177	163	186	178	176
RCP4.5	181	172	188	182	181	188	167	183	183	180
RCP8.5	175	166	182	177	175	175	150	184	169	168
Среднее	179	170	186	180	179	180	160	184	177	175

В четвертой части главы дана оценка изменения среднемноголетнего притока речных вод методом тенденций. Сделана оценка изменений среднемноголетних объемов притока речных вод к Волгоградскому гидроузлу на уровне 2030 и 2050 годов, опираясь на имеющиеся длительные гидрологические ряды восстановленного стока.

Суть метода тенденций заключается в том, что на основании упомянутых данных выделяются несколько квазистационарных многолетних периодов, для которых путем среднеквадратического сглаживания подбираются линейные зависимости среднего стока $W_{cp} = f(t)$ от времени. Затем выполняется линейная экстраполяция на горизонт прогноза, в качестве которого выбраны 2030 и 2050 годы. Подобранные линейные уравнения свидетельствуют, что годовому стоку XX и начале XXI столетия свойственны изменения, проявляющиеся локальными разнонаправленными трендами разных периодов, как это можно видеть на рисунке 3 и в таблице 4.

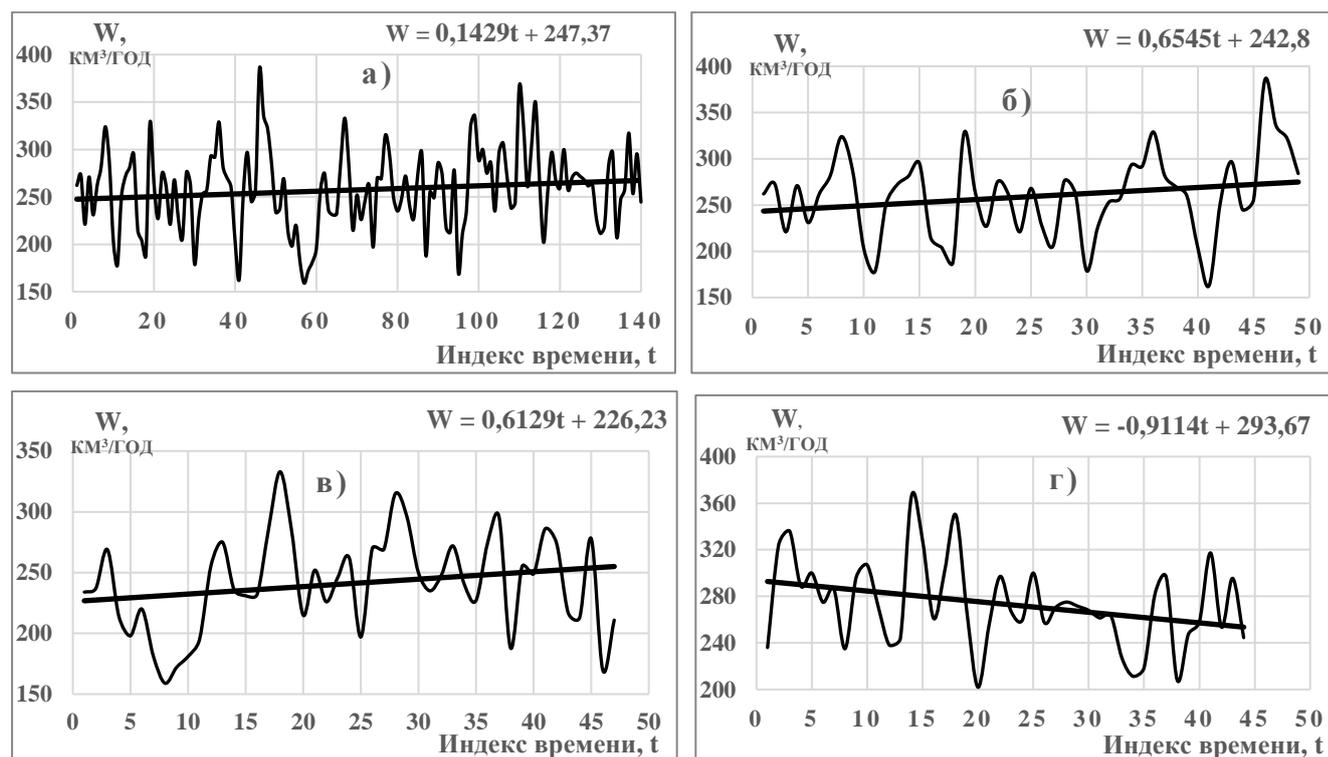


Рисунок 3 – Условно-естественный объем годового стока р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда: а) за период 1881/1882 – 2020/2021 гг.; б) за период 1881/1882 – 1929/1930 гг.; в) за период 1930/1931 – 1976/1977 гг.; г) за период 1977/1978 – 2020/2021 гг.

Таблица 4 – Прогноз изменения среднемноголетнего объема годового стока р. Волги у г. Волгограда по выявленным тенденциям.

№ п/ п	Периоды	W_{cp} за период $км^3/год$	Прогнозы W_{cp} , $км^3/год$		Приращение, $км^3/год$ (в %)	
			2030 г.	2050 г.	2030 г.	2050 г.
1.	1881/1882-2020/2021	257	269	272	12(5)	15(6)
2.	1881/1882-1929/1930	259	281	294	22(8)	35(14)
3.	1930/1931-1976/1977	241	261	273	20(8)	32(13)
4.	1977/1978-2020/2021	273	244	226	-29(11)	-47(17)
5.	1914/1915-2020/2021	258	274	278	16(6)	20(8)
6.	1914/1915-1976/1977	246	227	217	-19(8)	-29(12)
7.	1977/1978-2020/2021	276	243	222	-33(12)	-54(20)

Обобщая вышеприведенные результаты, можно прийти к выводу, что в первой половине XXI века будут иметь место свойственные речному стоку циклические колебания (чередование многоводных лет с маловодными), связанные с фазами потепления и похолодания, обладающие динамическим средним с различной интенсивностью.

В пятой части главы проведена вероятностная оценка притока речных вод к Волгоградскому гидроузлу с использованием динамико-стохастического подхода. Как установлено результатами исследований (части главы 1 и 4), многолетние колебания речного стока могут быть представлены в виде аддитивной функции:

$$W(t) = m(t) + u(t) \quad (27)$$

где $m(t)$ – детерминированная функция, а $u(t)$ – случайная функция.

Сравнивая регрессионную модель (23) с уравнением (27), получим следующие соотношения

$$m(t) = 1 + r(K_i - 1), u(t) = \Phi_{i+1} C_{V(i+1)} \sqrt{1 - r^2} \quad (28)$$

Подход предусматривает, что регрессионная модель (23) в первом приближении можно рассматривать как инструмент для вероятностной оценки многолетних колебаний речного стока, т.е. для построения кривых обеспеченности как в современном климате, так и для его изменений в будущем. В результате исследования в четвертой части главы 4 получены уравнения, устанавливающие тенденции (тренды) изменения стока в первой половине XXI века. На основании этих функциональных уравнений, была осуществлена оценка изменения среднемноголетнего стока Волги в створе Волгоградского гидроузла на уровне 2030 и 2050 годов. Все выборки временных рядов $W(t) : t \in T$ образуют ансамбль развития гидрологического процесса в бассейне Волги за периоды 1881/1882 – 2020/2021 гг. и 1914/1915 – 2020/2021 гг. При принятии гипотезы нестационарности первого порядка были получены ансамбли вероятностных прогнозов (кривые обеспеченности) в первой половине XXI века.

Как можно видеть из материалов таблицы 5 и рисунка 4, ординаты кривых обеспеченности в современном климате для части выборок показывают увеличение речного стока на (8-10) % при большой обеспеченности 75% - 95% и менее существенное увеличение стока (2-4) % в области малой обеспеченности. Таким образом, при анализе данных наблюдений базовых периодов 1881/1882 – 2020/2021 гг. и 1914/1915 – 2020/2021 гг. установлено, что с 1977/1978 года имело место в среднем повышение водности стока Волги, так как наблюдается увеличение ординаты кривой обеспеченности периода 1977/1978 – 2020/2021 гг. по сравнению с кривой обеспеченности за весь период наблюдения. При сопоставлении базовых периодов с выборками на уровне 2030 года вероятность превышения притока речных вод Волги в зоне формирования прогнозируется от 9 до 24 км³/год (4 – 7%) и на уровне 2050 года – от 11 до 30 км³/год (3 – 8%) по сравнению с кривыми обеспеченности современного климата.

Таблица 5 – Объем годового стока Волги у Волгограда при различной обеспеченности, км³/год.

№ выборки	Периоды	Обеспеченности, в %-ах						
		1,0	5,0	50	75	80	90	95
1		Базовый (расчетный) период						
1.1	1881/1882-2020/2021	370	333	254	226	220	203	190
1.2	1881/1882-1929/1930	373	336	256	228	222	205	192
1.3	1930/1931-1976/1977	347	312	238	212	206	190	178
1.4	1977/1978-2020/2021	370	339	271	246	241	225	214
1.5	1914/1915-2020/2021	378	339	255	225	219	201	187
1.6	1914/1915-1976/1977	368	328	243	213	206	188	175
1.7	1977/1978-2020/2021	375	343	274	249	243	228	216
2		Оценка (прогноз) на уровне 2030 год						
2.1	1881/1882-2020/2021	387	349	266	237	230	213	199
2.2	1881/1882-1929/1930	405	364	278	247	241	222	208
2.3	1930/1931-1976/1977	376	338	258	230	223	206	193
2.4	1977/1978-2020/2021	331	303	242	220	215	202	191
2.5	1914/1915-2020/2021	402	360	271	239	232	213	199
2.6	1914/1915-1976/1977	339	302	224	196	190	174	161
2.7	1977/1978-2020/2021	330	302	241	219	214	201	191
3		Оценка (прогноз) на уровне 2050 год						
3.1	1881/1882-2020/2021	392	353	269	239	233	215	201
3.2	1881/1882-1929/1930	423	381	291	259	252	232	218
3.3	1930/1931-1976/1977	393	354	270	240	234	216	202
3.4	1977/1978-2020/2021	307	281	224	204	199	187	177
3.5	1914/1915-2020/2021	408	365	275	243	235	216	202
3.6	1914/1915-1976/1977	324	289	214	188	182	166	154
3.7	1977/1978-2020/2021	301	276	220	200	196	183	174

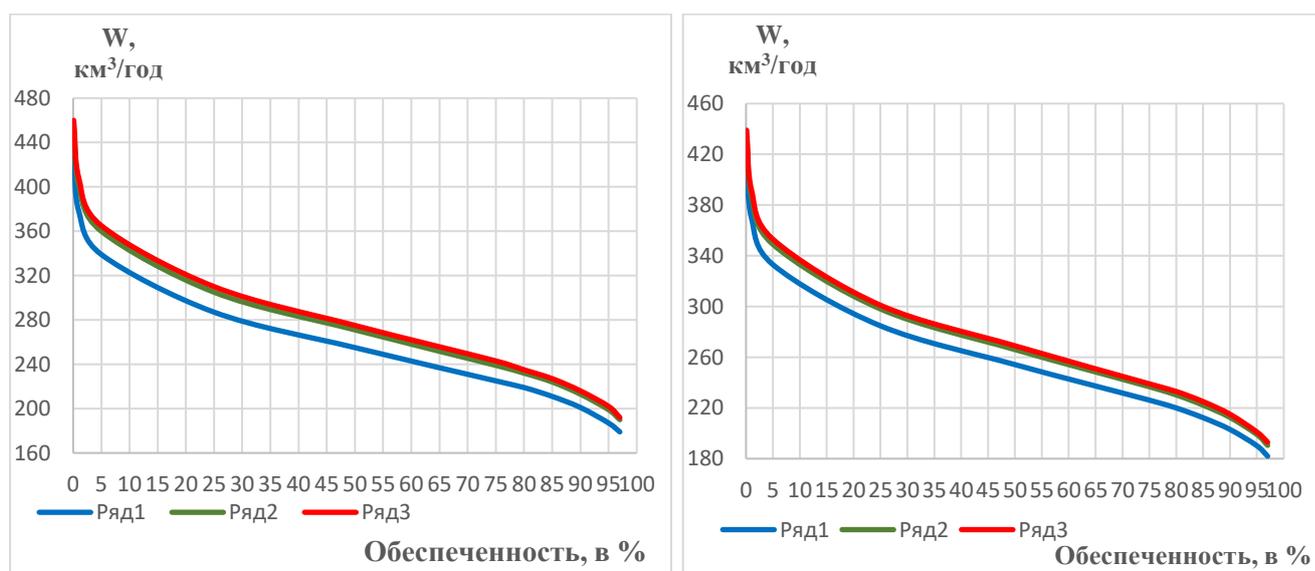


Рисунок 4 – Кривые обеспеченности условно-естественного годового притока Волги в зоне формирования у Волгограда для рядов 1914/1915 – 2020/2021 гг. и 1881/1882 – 2020/2021 гг.: ряд 1) при современном климате; ряд 2) на уровне 2030 г.; ряд 3) на уровне 2050 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ современных воднобалансовых исследований показывает, что прогноз состояния ЭВБ, особенно суммарного испарения и бассейновых влагозапасов, их участия в формировании речного стока является одной из сложнейших проблем в гидрологии. Поэтому наиболее перспективными являются такие методы исследований, которые могут интегрально оценить суммарное испарение и бассейновые влагозапасы с учетом взаимосвязи определяющих их природных и антропогенных факторов.

2. Разработанная информационно-аналитическая база данных гидрометеорологических характеристик климатических условий речного водосбора применительно к бассейну Волги (свидетельство интеллектуальной собственности № RU 2024620214), представляет собой основу для проектной деятельности в бассейне реки Волги, а также использования при актуализации ПИВР водохранилищ волжско-камского каскада гидроузлов.

3. Предложенная методика оценки элементов водного баланса большого речного бассейна, позволяет по-новому подойти к определению их величин и анализу закономерностей межгодовой и сезонной изменчивости, степени взаимосвязи ЭВБ в системе «приземной слой атмосферы-речной водосбор-русло реки-замыкающий водоем». Реализация предложенной методики оценки ЭВБ бассейна Волги позволила получить достаточно длительные временные ряды по основным ЭВБ. Это дало возможность осуществить ретроспективный сравнительный анализ многолетних колебаний ЭВБ в бассейне Волги и выявить свойственные им закономерности на протяжении периода наблюдений. Эти закономерности являются основанием для построения оценочных уравнений связи притока речных вод к замыкающим створам от природных (климатических) факторов на современном этапе и в прогнозируемой перспективе.

4. Проведен ретроспективный сравнительный анализ ЭВБ бассейна Волги. Выделены циклы колебаний водности, включающие многоводную и маловодную ветви: первый цикл колебания водности с 1891/1892 по 1929/1930 гг. (n=39 лет) и второй с 1930/1931 по 2004/2005 гг. (n=75 лет). В 2005/2006 году, по всей видимости, начался третий цикл водности в бассейне Волги. За последние 16 лет средний сток волжского бассейна снизился до уровня базового среднемноголетнего стока. По-видимому, начавшийся третий цикл с 2005/2006 по 2020/2021 в волжском бассейне в начале будет сопровождаться снижением притока речных вод, а затем его повышением.

В динамике суммарного испарения наблюдаются противофазные направления. Цикл, который выделяется в динамике суммарного испарения с поверхности суши водосборов бассейна Волги, является зеркальным отражением циклов речного стока. Фазам снижения речного стока соответствуют фазы роста суммарного испарения, а фазам роста речного стока – фазы его снижения. Так, например, начиная с 1914/1915 по 1961/1962 гг. наблюдается увеличение суммарного испарения, а далее с 1962/1963 по 2011/2012 снижение данного элемента водного баланса. Начиная с 2012/2013 года и по настоящее время происходит повышение суммарного испарения.

5. Анализ сценариев в рамках модели общей циркуляции атмосферы SRES A2, SRES A1B, SRES B1 (CMIP3) показывает, что на уровне 2011-2030 года изменение нормы годового стока Волги у Волгограда в различных сценариях отличается незначительно. Если рассмотреть осредненные значения притока речных вод к Волгоградскому гидроузлу по сценариям и функциональным уравнениям, то по первой версии они составят $265 \text{ км}^3/\text{год}$, по второй версии $-250 \text{ км}^3/\text{год}$. Сходные результаты получены для уровня 2041-2060 год, по первой версии $-267 \text{ км}^3/\text{год}$, по второй версии $-241 \text{ км}^3/\text{год}$. Норма притока речных вод к Волгоградскому гидроузлу изменяется в зависимости от версии. По первой версии может возрасти на уровне 2011-2030 года на $8 \text{ км}^3/\text{год}$ и на уровне 2041-2060 года $10 \text{ км}^3/\text{год}$, по второй версии может снизиться на уровне 2011-2030 года на $7 \text{ км}^3/\text{год}$ и на уровне 2041-2060 года ожидается снижение на $6 \text{ км}^3/\text{год}$.

Анализ сценариев версии (CMIP5) RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 показал следующие результаты. Согласно сценарию RCP2.6 норма годового стока Волги у г. Волгограда для первой версии составляет $264 \text{ км}^3/\text{год}$ на уровне 2011 – 2030 годов, приток речных вод к Волгоградскому гидроузлу повысится на $7 \text{ км}^3/\text{год}$, а на уровне 2041 – 2060 составит $171 \text{ км}^3/\text{год}$, что на $14 \text{ км}^3/\text{год}$ выше по сравнению с базовым периодом. По второй версии сток будет $246 \text{ км}^3/\text{год}$ на уровне 2011 – 2030 гг., т.е. произойдет снижение среднемноголетнего притока на $11 \text{ км}^3/\text{год}$, на уровне 2041 – 2060 гг. $239 \text{ км}^3/\text{год}$, т.е. уменьшение на $18 \text{ км}^3/\text{год}$ по сравнению с базовым периодом. Схожая ситуация имеет место применительно к сценариям RCP4.5 и RCP8.5. Таким образом, исследование изменения среднемноголетнего притока Волги к Волгограду с учетом сценариев CMIP5 показало, что в зависимости от базового периода могут быть разные результаты.

6. Получены закономерности многолетних колебаний ЭВБ и их взаимосвязи стали основанием для установления зависимости сезонного и годового стока Волги у г. Волгограда (R) от атмосферных осадков (P), суммарного испарения (E), эффективных осадков ($P-E$) и температуры подстилающей поверхности (T^*). Коэффициенты множественной корреляции (η) для уравнений (16) – (28) изменяются от 0,80 до 0,90, а коэффициенты детерминации (η^2) – от 0,64 до 0,81. Это свидетельствует о том, что зависимости (16) – (22) включают в себя больше 80% дисперсии годового и сезонного стока, что дает возможность использовать их для оценки вероятного изменения стока Волги в рамках различных сценариев изменения климата. В ходе исследований установлено, что в стационарных условиях математическое ожидание нормы стока в замыкающем створе у Волгограда на уровне 2030 г. оценивается в $262 \text{ км}^3/\text{год}$, а на 2050 г. $-265 \text{ км}^3/\text{год}$.

7. Проведена оценка и учет нестационарности в многолетних колебаниях речного стока. Установлено, что развитие гидрологических процессов в речном бассейне включает как детерминированную, так и стохастическую составляющую. Для отображения характера развития гидрологических процессов при наличии достаточно длительных временных рядов гидрологических характеристик $\{W(t) : t \in T\}$, рекомендуется использовать метод тенденций для статистических закономерностей, проявившихся в прошлом.

8. Проведенная вероятностная оценка годовых объемов притока Волги к Волгоградскому гидроузлу сводится к решению двух задач: определению условий изменения во времени детерминированной составляющей:

- оценке изменения среднееголетней величины гидрологической характеристики $\{W(t):t \in T\}$ во времени и ее экстраполяции на период прогноза
- установлению характера колебаний стохастической составляющей, т.е. построение прогнозной кривой обеспеченности гидрологической характеристики $\{W(t):t \in T\}$.

Для решения первой задачи, при наличии временных рядов гидрологической характеристики $\{W(t):t \in T\}$, получены функциональные уравнения, характеризующие изменение среднееголетней величины (нормы) притока Волги к Волгоградскому гидроузлу во времени (t). Для решения второй задачи, построены ансамбли прогнозных кривых обеспеченностей стока Волги у Волгограда.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. **Исмайлова, И.Г.** Исследование многолетней изменчивости элементов водного баланса речного бассейна в современном климате / И.Г. Исмайлова // *Природообустройство*. – 2024 – №2. – С. 69-78.
2. **Исмайлова, И.Г.** Имитационная модель для анализа и оценки многолетнего и сезонного колебания элементов водного баланса бассейна реки Волги / И.Г. Исмайлова, Л.Д. Раткович // *Природообустройство*. – 2023. – №5. – С. 103 –110.
3. **Исмайлова, И.Г.** Формирование временных рядов гидрометеорологической информации для оценки изменчивости элементов водного баланса / И.Г. Исмайлова, Л.Д. Раткович // *Гидротехническое строительство*. – 2023. – №11. – С. 20 – 26.
4. **Исмайлова, И.Г.** Учет и оценка нестационарности при управлении водными ресурсами речного бассейна / И.Г. Исмайлова, Г.Х. Исмайлов, Н.В. Муращенкова // *Природообустройство*. – 2023. – №1. – С. 82 – 88.
5. **Исмайлова, И.Г.** Обоснование развития гидрологических процессов с использованием динамико-стохастического подхода // И.Г. Исмайлова, Г.Х. Исмайлов, Н.В. Муращенкова и др. // *Природообустройство*. – 2022. – №5. – С. 74-82.
6. **Исмайлова, И.Г.** Анализ и прогноз речных вод в зоне формирования стока реки Волги методом тенденций / И.Г. Исмайлова и др. // *Природообустройство*. – 2022. – №2. – С. 69-78.
7. Исмайлов, Г.Х. Оценка многолетних изменений качественных характеристик стока реки Оки / Г.Х. Исмайлов, Н.В. Муращенкова, **И.Г. Исмайлова** // *Природообустройство*. –2021. – №5. – С. 98-104.
8. Исмайлов, Г.Х. Ретроспективная оценка незарегулированных боковых приточностей Куйбышевского (ныне Жигулевской ГЭС) гидроузла бассейна р. Волги / Г.Х. Исмайлов, Н.В. Муращенкова, **И.Г. Исмайлова** // *Природообустройство*. – 2021. – №1.– С. 87-99.
9. Исмайлов, Г.Х. Методика анализа функционирования сложных водохозяйственных систем на примере Волжско-Камского каскада гидроузлов / Г.Х. Исмайлов, А.В. Перминов, **И.Г. Исмайлова** // *Природообустройство*. – 2021. – №2. – С. 131-140.
10. Исмайлов, Г.Х. Методика оценки сложноформируемых элементов водного баланса (суммарного испарения и влагозапасов) речного бассейна / Г.Х. Исмайлов, Н.В. Муращенкова, **И.Г. Исмайлова** // *Природообустройство*. – 2020. – №5. – С. 88-95.

В изданиях международных баз Scopus или Web of Science:

11. **Ismayilova, I.G.** Generation of hydrometeorological time series data to assess the variability of water balance elements / I.G. Ismayilova // *Power Technology and Engineering*. – 2024. – Vol. 58, No. 1. – P. 6-11.

Патенты и свидетельства:

12. **Исмайлова И.Г.**, Свидетельство о регистрации базы данных RU 2024620214, 16.01.2024. «Формирование временных рядов гидрометеорологической информации для оценки изменчивости элементов водного баланса»

Работы, опубликованные в других изданиях:

13. Исмайылов, Г.Х. Оценка однородности временных рядов элементов водного баланса бассейна реки Волги / Г.Х. Исмайылов, Н.В. Муращенко, **И.Г. Исмайылова** // В сборнике: Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях. Материалы X Международной научно-практической конференции – Саратов. – 2023. – С. 43-48.

14. Исмайылов, Г.Х. Изменение количественных характеристик речного стока в бассейне верхней Волги (на примере частного водосбора Ивановского водохранилища) / Г.Х. Исмайылов, Н.В. Муращенко, **И.Г. Исмайылова** // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – Ростов-на-Дону. – 2022. – Т.1. – №7 – С. 115 – 118.

15. Исмайылов, Г.Х. Закономерности многолетней изменчивости годового стока реки Дон / Г.Х. Исмайылов, Н.В. Муращенко, **И.Г. Исмайылова** // В сборнике: Наука, технологии, общество - НТО-II-2022, сборник научных статей по материалам II Всероссийской научной конференции. – Красноярск. – 2022. – С. 31–37.

16. Исмайылов, Г.Х. Гидрологические изменения в бассейне верхней Волги (на примере частного водосбора Ивановского водохранилища) / Г.Х. Исмайылов, Н.В. Муращенко, **И.Г. Исмайылова** // В сборнике: Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: Материалы IX Международной научно-практической конференции – Саратов. – 2022. – С. 28-32.

17. Исмайылов, Г.Х. Ретроспективный анализ изменения водности реки Дон / Г.Х. Исмайылов, Н.В. Муращенко, **И.Г. Исмайылова** // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – Ростов-на-Дону, 2021. – Т.1. – №6 – С. 84-87.