

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

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

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Раткович Лев Данилович

Москва – 2024

Оглавление	
Введение	4
ГЛАВА 1. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ОБЩЕЙ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОЛОГИИ, СВЯЗАННЫЕ С ИЗМЕНЕНИЯМИ ВОДНОГО БАЛАНСА РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ	17
1.1. Оценка и анализ современного состояния развития воднобалансовых исследований	17
1.2. Структура и генетические основы формирования элементов водного баланса	28
1.3. Методика количественного определения основных составляющих ЭВБ	35
1.4. Влияние природных и антропогенных факторов на ЭВБ речного бассейна	47
ГЛАВА 2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭВБ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКИ	55
2.1. Совершенствование методики определения трудноизмеряемых элементов водного баланса, таких как суммарное испарение с территории речного бассейна и изменение бассейновых влагозапасов	55
2.2. Результаты расчета годового и сезонного суммарного испарения и изменения бассейновых влагозапасов	65
2.3. Бассейн р. Волги как модель природной системы	73
2.4. Анализ сценариев возможного изменения климата и его влияние на ЭВБ бассейна реки Волги	80
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЛЕТНИХ И ВНУТРИГОДОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА БАССЕЙНА ВОЛГИ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА И ДИНАМИКИ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ В XX ВЕКЕ.	87
3.1. Сравнительный ретроспективный анализ закономерностей многолетних и внутригодовых колебаний ЭВБ бассейна реки Волги	87
3.2. Верификация уравнений связи годового и сезонного стока реки Волги от определяющих его природных (климатических) показателей	103
3.3. Оценка стационарности (нестационарности) и однородности (неоднородности) элементов водного баланса бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда	110
ГЛАВА 4. ПРОГНОЗ РЕЧНОГО СТОКА РЕКИ ВОЛГИ В ЗОНЕ ФОРМИРОВАНИЯ У ВОЛГОГРАДА В XXI ВЕКЕ	125
4.1. Оценка нестационарности в многолетних колебаниях речного стока	125

4.2. Прогноз изменения среднегоголетнего стока р. Волги в зоне формирования на основе вероятностно-статистического подхода	136
4.3. Прогноз среднегоголетнего стока р. Волги в зоне формирования на основе связи речного стока с климатическими показателями в соответствии со сценариями «МОЦАО».....	139
4.4. Оценка изменения среднегоголетнего притока речных вод методом тенденций.....	147
4.5. Вероятностная оценка притока речных вод с использованием динамико-стохастического подхода	157
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	171
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	180
ПРИЛОЖЕНИЕ	196

Введение

Одной из важнейших проблем, которые решала гидрологическая наука на протяжении всего 20-го века, является развитие процесса формирования речного стока в речных бассейнах. В основном это связано с тем, что в отличие от других видов природных ресурсов, речной сток обладает свойством непрерывного возобновления. Это происходит в процессе круговорота влаги на Земле (водообмен между сушей и океаном) и также характеризуется большой изменчивостью во времени и пространстве [14, 33].

Развитие водопотребления населением и секторами экономики, а также проблема экологической безопасности стали дополнительным стимулом для более широкого подхода к изучению речного стока, рассмотрению его в тесной связи с климатом и ландшафтом Земли, то есть как элемента водного баланса (ЭВБ). Далее, это потребовало изучения всего гидрологического цикла, происходящего в речной системе, такого как временные и пространственные изменения суммарных атмосферных осадков, суммарного испарения с поверхности воды, а также инфильтрацию воды в почву и динамику влаги в толще почво-грунтов, и наконец, притока речных вод в замыкающем водоеме. В такой широкой постановке определение водного баланса подтверждается практической реализацией идей основоположника гидрологической науки В.Г. Глушкова о единстве природных вод и открывает возможность создать научные базы для прогнозирования и оптимального управления природными режимами водных объектов [163].

Изучение процессов формирования речного стока совместно с другими элементами водного баланса оказалось одной из наиболее сложных проблем XX века. Для решения этой сложной проблемы необходимо знание формирования ЭВБ территории речных водосборов. Естественно, в этих условиях основные задачи гидрологической науки заключались в познании закономерностей гидрологических процессов в речном бассейне и разработке методов оценки их статистических параметров во взаимосвязи. Прежде всего, имеются ввиду системы уравнений связи годового и сезонного стока с природными и ландшафтными

факторами. На этой основе становится возможным прогнозирование притока речных вод в замыкающий водоем на ближайшее время и в будущем. В результате, было создано целостное учение о речном стоке, основу которого составляет процесс выпадения, стекания, испарения и инфильтрация атмосферных осадков на поверхности речного бассейна и его связи от климатических и ландшафтных (рельеф, почво-грунты, растительный покров и т.п.) факторов.

Управление водными ресурсами речных бассейнов – одна из самых актуальных задач XXI века, которая может быть решена только в результате познания механизмов формирования ЭВБ бассейна [14]. Недостаточность наших знаний о соотношениях между ЭВБ, их взаимосвязях и связях между собой, а также относительно большая неопределенность в прогнозе многолетней изменчивости не позволяют просчитать и учесть все возможные последствия, которые могут возникнуть в результате изменения условий окружающей среды.

Немаловажную роль играют влияние на естественный водный режим речного бассейна различные формы использования водных ресурсов в хозяйственных целях. Выявление характера и количественной оценки этого воздействия наиболее целесообразно решить на основе воднобалансового метода. Другим важным фактором является проблема наводнения территории Российской Федерации [2, 3]. На большей части территории страны наводнения происходят весной в период таяния снегов, летом причиной наводнений становятся обильные дожди, от которых особенно страдают районы Северного Кавказа и Дальнего Востока. Например, в 1908 г. на европейской части России произошло небывалое наводнение в бассейне Верхней Волги [64]. Прохождение весеннего половодья усугубилось еще и тем, что в конце апреля в течение нескольких недель шли проливные дожди. Страна понесла огромные убытки. Наводнения территорий при высоких половодьях начинаются при обеспеченности речного стока $P = 1 - 10\%$ [2]. Водный баланс является также основой для составления водохозяйственных балансов, целью которых является сопоставление возможных для использования водных ресурсов с существующей или ожидаемой потребностью в воде общества.

Следует отметить, что научной основой (критерий и надежность оценки) формирования и оптимального управления водными ресурсами речного бассейна выступают складывающиеся соотношения элементов водного и водохозяйственного баланса. В самом общем виде под водным балансом понимают совместное рассмотрение и сопоставление количественных характеристик прихода, расхода и изменения запасов влаги в пределах речного бассейна в определенный промежуток времени. С его помощью можно научно обосновать прогноз изменения притока речных вод в характерных створах речного бассейна [14, 15, 16, 17, 33]. Воднобалансовые исследования открывают принципиально новые возможности в гидрологии, в частности, заблаговременное предвидение многолетней изменчивости ЭВБ бассейна и построение уравнений связи притока речных вод в зоне формирования в зависимости от времени и от общих факторов воздействия климата [61, 135]. Метод водного баланса позволяет рассматривать все гидрологические явления в их совокупности и взаимосвязи. Соответственно, водный баланс можно рассматривать как систему, состоящую из отдельных взаимосвязанных процессов переноса влаги, находящуюся в состоянии динамического равновесия. В таких системах изменение одного из элементов (процессов) неизбежно вызывает изменение остальных элементов. Это предоставляет широкие возможности для воздействия на водный режим речных бассейнов и на управление ими.

Водный баланс речного бассейна складывается в результате сложного взаимодействия вертикального влагообмена (атмосферные осадки и испарение), обусловленного термодинамическими факторами, с горизонтальным влагообменом (склоновой, русловой и подземный сток), определяемым гидромеханическими факторами. ЭВБ свойственна пространственно-временная изменчивость. В первом случае рассматриваются особенности распределения и изменчивости ЭВБ по территории, а во втором случае – во времени.

В результате взаимодействия климатических факторов с местными ландшафтными условиями речной бассейн выполняет функцию регулирования влагой водосборной территории, которая выражается уравнением водного баланса

на определенном отрезке времени [6]. Однако, в силу реальных условий, связанных с многофакторными (природными и антропогенными факторами) и с различными ошибками (систематическими и случайными) получается расхождение между наблюдаемыми значениями ЭВБ с их действительными значениями. Следовательно, вместо равенства между приходными и расходными составляющими водного баланса, получается суммарная невязка баланса. Поэтому большое значение приобретает вопрос о надежности оценки и прогноза ЭВБ речного бассейна, особенно речного стока, поскольку от его решения зависят многие проблемы, связанные с водообеспечением населения, секторов экономики и с сохранением безопасности окружающей среды. Кроме того, при современном уровне развития измерительных приборов, которые определяют элементы водного баланса, даже такие как радиолокационные измерительные приборы, является очень сложным, особенно измерение таких ЭВБ как испарение с территории средних и больших речных водосборов и изменение бассейновых влагозапасов.

Необходимо отметить, что информации, которая содержится в материалах обычных массовых (справочно-информационных) гидрометеорологических наблюдений, совершенно недостаточно для составления воднобалансовых уравнений за отдельные годы, сезоны и месяцы. Пока еще не найдены методы, позволяющие извлекать наиболее полную информацию из материалов инструментальных гидрометеорологических наблюдений. В этих условиях очень важным является, во-первых, организация информационно-аналитических систем, включающих в себя сбор, анализ и обобщение большого количество данных гидрометеорологических наблюдений, во-вторых, расширение теории и методов воднобалансовых исследований, которые связаны с разработкой новых методов, позволяющих получить системы уравнений взаимосвязи ЭВБ и, прежде всего, системы уравнений притока речных вод, и наконец, в-третьих, разработка способов предвидения изменения речного стока с учетом сценариев возможного изменения глобального климата Земли и фактора времени. Разумеется, поставленные задачи можно осуществить, только используя справочные системы: 1) АО «Институт Гидропроект» <http://www.mhp.rushydro.ru>; 2) портал «Всесоюзный научно-

исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных» – www.meteo.ru; 3) цифровая платформа «Водные данные» Государственного водного реестра (Росводресурсы) – www.gis.favr.ru и информация, полученная на воднобалансовых станциях [102, 125, 137, 169].

Накопленная гидрометеорологическая информация по речным бассейнам Российской Федерации, особенно в Европейской территории России (ЕТР) и намеченные изменения климата и, соответственно, изменение регионального климата [25, 61, 95] требуют нового (современного) научного подхода к определению ЭВБ речного бассейна. Именно совершенствование методологии и методики оценки ЭВБ с учетом наметившейся нестационарности в современном климате Земли позволит достаточно близко подойти к созданию научно обоснованной базы, позволяющей прогнозировать приток водных ресурсов в замкнутой системе водоемов как в настоящем времени, так и в будущем. Это в свою очередь создаст достаточно мощную гидрологическую основу рационального управления водными ресурсами страны.

В связи с этим, в исследовании поставили задачу на основе теоретического и экспериментального материала изучения закономерностей формирования элементов водного баланса (суммарного испарения, суммарного речного стока, общей массы атмосферных осадков на территории речного водосбора, трансформация бассейновых влагозапасов и температуры воздуха, включая температуры теплого и холодного периода) речного бассейна, усовершенствовать методику определения водного баланса, которая позволит оценить (прогнозировать) приток воды в речных створах, которые имеют характерные особенности, базируясь при этом на общедоступной гидрометеорологической информации, публикуемой в серийных гидрологических и метеорологических изданиях (ежемесячниках, ежегодниках и других справочных материалах), а также научно прикладных справочниках, включающих в себя многолетние изменения ЭВБ на водобалансовых станциях [125]. Это стало возможным благодаря сбору и анализу большого количества данных гидрометеорологических наблюдений о речном стоке, осадках и испарении в пределах исследуемой территории.

Полученные результаты воднобалансовых исследований позволили организовать справочно-аналитическую систему гидрометеорологической информации исследуемого речного бассейна, включающую в себя достаточно длительные временные ряды ЭВБ и на основе этой системы осуществить сравнительный анализ с целью выявления причинных связей изменения ЭВБ во времени. Далее, опираясь на данную справочно-аналитическую информационную систему осуществлена идентификация притока речных вод в исследуемом речном бассейне, т.е. получены системы уравнений связи притока речных вод во времени и для различных сценариев возможного изменения регионального климата. Эти системы уравнений послужили основанием для разработки методики прогнозирования притока речных вод как в ближайшей, так и в отдаленной перспективе. Объектом исследования выступает бассейн р. Волги как модель природной системы для изучения формирования составляющих элементов водного баланса во времени и при нестационарности современной климатической системы и на этой основе прогнозирование притока речных вод в зоне формирования у г. Волгограда как в ближайшей, так и в отдаленной перспективе.

Достаточно отметить, что многие научно-исследовательские институты, включая кафедры гидрологии университетов страны, последние 30 лет усиленно искали пути решения многих водных проблем страны, в том числе углубление познания закономерностей в области воднобалансовых исследований. Диссертация посвящена подробному изложению результатов исследований автора, направленных на анализ временных закономерностей ЭВБ и прогнозирование притока речных вод к Волгоградскому гидроузлу в ближайшее время и в будущем.

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.

В нашей стране и за рубежом, в начале XXI века проявился огромный интерес к проблемам, связанным с водными ресурсами. Увеличиваются требования к воде в связи с растущей экономикой, а также возникает потребность в охране

источников воды как важнейшего элемента окружающей природной среды. В этой связи, необходимо учитывать вероятные изменения климата.

При оценке притока речных вод к замыкающему водоему на перспективу необходимо учитывать климатическую ситуацию, сложившуюся с 70-х годов XX века, которая существенным образом отразилась на годовом и особенно сезонном стоке рек [40, 49]. Ожидается уменьшение объема стока половодья и возрастания стока в межень. По данным исследований [49, 164, 171] к 2050 году количество возобновляемых водных ресурсов на территории юга и Западной Сибири значительно сокращается, достигая в среднем 20-30 %. В хорошо увлажненных регионах водные ресурсы увеличиваются. Поэтому необходимо заблаговременное определение влияния изменения климата на ЭВБ речного бассейна и на этой основе построение методологии и метода прогнозирования притока речных вод в зоне формирования как на ближайшую, так и на отдаленную перспективу.

Акцентируя внимание на изменении водных запасов ($\pm\Delta V$) в структуре четырехчленного уравнения водного баланса, отметим, что невозможно с помощью экспериментальных методов получить однозначную оценку общего испарения и объема водных ресурсов для средних и больших водосборов [95, 164].

Современная гидрология не обладает возможностью точного и детализированного прогнозирования изменения речного стока в ближайшем, тем более в отдаленном будущем. Динамико-стохастический подход к анализу данных гидрометеорологических наблюдений за формированием речного стока является одним из наиболее действенных способов прогнозирования его изменения в будущем, как в ближайшей, так и в отдаленной перспективе для создания гидрологической основы управления водных объектов [54, 135]. Таким образом, и для XXI века одной из фундаментальных и актуальных задач гидрологии суши по-прежнему является задача совершенствования методики определения ЭВБ водных бассейнов. Соответственно, исследования, направленные на совершенствование методики оценки и взаимосвязи ЭВБ речного бассейна и на этой основе прогнозирование притока речных вод в зоне формирования как в ближайшей, так и в отдаленной перспективе являются актуальными и своевременными.

Объект и предмет исследований. В качестве объекта исследования в диссертации рассмотрен бассейн реки Волги. Предметом исследования являются закономерности формирования элементов водного баланса речного бассейна, в частности бассейна реки Волги в зоне формирования стока. Используются методы математической статистики, инструменты корреляционного и регрессионного анализа.

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 Волги) с учетом вероятной динамики процессов и возможных сценариев изменения климата. Информационной базой исследований является накопленная гидрометеорологическая информация за 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 анализа и оценки закономерностей межгодовой и сезонной изменчивости ЭВБ в условиях нестационарности их формирования;
4. Ретроспективный сравнительный анализ материалов гидрометеорологической информации по Волге, начиная с момента проведения фактических наблюдений и до настоящего времени с целью моделирования ЭВБ в ближайшей и отдаленной перспективе;
5. Анализ вероятных сценариев изменения глобального и регионального климата в XXI веке применительно к бассейну Волги;
6. Сопряженный анализ ЭВБ бассейна Волги в зоне формирования и идентификация параметров уравнений связи притока речных вод р. Волги в зоне формирования у Волгограда с учетом возможных сценариев изменения климата;

7. Оценка и учет нестационарности в многолетних колебаниях речного стока.

8. Прогнозирование стока р. Волги в зоне формирования с учетом возможных сценариев изменения климата.

Научная новизна исследований.

1. Предложена методика комплексной оценки элементов водного баланса 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. Были установлены закономерности многолетних колебаний ЭВБ в бассейне реки Волги. В конечном итоге результаты проведенных исследований создали научную базу для оценки условий формирования водного баланса р. Волги и отдельных его составляющих на фоне возможных изменений климата и стратегии развития экономики в этом регионе России.

3. Установлен устойчивый положительный тренд в многолетних колебаниях сезонного и годового притока к створу Волгограда, в динамике среднемноголетнего значения суммарного испарения и в температурном режиме воздуха.

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

5. Сделана оценка изменения нормы притока р. Волги к Волгоградскому гидроузлу на перспективу 2030 – 2060 годов для основных сценариев МОЦАО: SRESA2, SRESA1B, SRESB1 (CMIP3) и 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 построены прогнозные кривые обеспеченности на уровне 2030 года и на уровне 2050 года.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов

Результаты диссертационной работы дают возможность дальнейшего развития методологии и методов оценки пространственно-временных закономерностей формирования ЭВБ крупных речных бассейнов. Практическая значимость работы обусловлена тем, что ее результаты могут быть использованы для решения проблем современного и перспективного водообеспечения населения, промышленности, сельского хозяйства, гидроэнергетики, судоходства, естественного и искусственного рыбозаведения и т.п. Требуются надежные и детальные исследования процессов формирования ЭВБ, особенно притока к гидроузлам во времени и пространстве. Прогнозируемые климатологами к середине XXI века значительные изменения характеристик глобального и регионального климата нужно учитывать при проектировании долгосрочных водохозяйственных мероприятий для решения проблем водообеспечения и защиты окружающей среды. Результаты диссертационной работы могут эффективно использоваться в Схемах комплексного использования и охраны водных ресурсов 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.

Материалы и методы исследований.

В основе исследования лежат теоретические научные положения о динамико-стохастической природе изменения элементов водного баланса речной системы, что позволило применить инструменты корреляционного и регрессионного анализа, в том числе подходы, разработанные автором для оценки ЭВБ природных комплексов. Соискателем предложены системы уравнений для оценки трудноизмеряемых ЭВБ и построения прогнозных кривых обеспеченности речного стока в замыкающих створах речного бассейна. При рассмотрении математического ожидания и дисперсии временного ряда видно, что он разбивается на некоторую систематическую составляющую (среднюю) и случайные отклонения от нее. При анализе временных рядов этот факт приводит к

его представлению в виде суммы некоторой неслучайной функции времени (детерминированная часть временного ряда или тренд) и случайной величины с нулевой средней и дисперсией. Предлагаемые методы анализа водного баланса речного бассейна базируются на теоретических положениях, разработанных в лаборатории моделирования поверхностных вод Института водных проблем РАН (г. Москвы).

В качестве основных материалов были использованы данные многолетних наблюдений на гидрометеорологической сети Росгидромета, Государственного водного реестра (Росводресурсы), АО «Институт Гидропроект» и наблюдений воднобалансовых станций. Также были использованы материалы различных организаций, включая картографические материалы открытых источников.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Методология 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 параметров климата и фактора времени.

3. Прогнозирование статистических показателей притока Волги к Волгоградскому гидроузлу методом тенденций в сочетании с динамико-стохастическим методом при разных сценариях эмиссии парниковых газов в атмосфере.

4. Результаты исследований, полученные с учетом сценариев возможного изменения климата «МОЦАО» нового поколения CMIP3 и CMIP5, адаптированных для бассейна Волги в условиях изменяющегося климата и антропогенной деятельности.

5. Прогнозирование 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 и

функциональные уравнения, связывающие приток речных вод с изменениями климата во времени.

Степень обоснованности и достоверности полученных результатов.

Обоснованность полученных результатов обеспечивается применением современных математических методов, преимуществом теоретических подходов и компьютерно-информационных технологий. В основе исследований лежит использование достоверного исходного материала, что обеспечивает, в сочетании с применяемыми методиками, надежность результатов.

Личный вклад соискателя. Постановка задачи, проведение теоретических и практических исследований по усовершенствованию оценки (прогноза) ЭВБ речного бассейна применительно к бассейну реки Волги. Разработка предлагаемой 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. Соискателем применительно к бассейну Волги получены достаточно длительные временные ряды (более 100 лет) ЭВБ рассматриваемой территории. Предложены системы уравнений для анализа трудно измеряемых ЭВБ и построения прогнозных кривых обеспеченности речного стока в замыкающем створе речного бассейна. Содержание всех разделов диссертации и автореферата, основные теоретические положения и практические выводы, которые содержатся в диссертации, были выполнены автором самостоятельно.

Апробация результатов диссертации. 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 г. (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 научно-практическая конференция (Россия, г. Саратов, 2023); 5) IX Международная научно-практическая 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 «Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем» (Россия, г. Ростов-на-Дону, 2021); 10) Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность» (Россия, г. Севастополь, 2021).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, в том числе 10 опубликованы в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 197 страницах. Состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержит 38 таблиц, 24 рисунка. Список литературы включает в себя 176 наименований, в том числе 11 иностранных изданий.

ГЛАВА 1. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ОБЩЕЙ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОЛОГИИ, СВЯЗАННЫЕ С ИЗМЕНЕНИЯМИ ВОДНОГО БАЛАНСА РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ

1.1. Оценка и анализ современного состояния развития воднобалансовых исследований

В гидрологии воднобалансовые исследования являются одним из основных разделов, который помогает решать важные теоретические и практические проблемы в области инженерной гидрологии. Результаты анализа ЭВБ служат основой для количественной оценки водных ресурсов и их изменений под воздействием природных факторов и деятельности человека. Благодаря работам ученых, которые занимались развитием методики водных балансов и непосредственно ЭВБ сформировались современные направления стохастической гидрологии, сделавшей ее одной из важнейших областей гидрологии суши и инженерной гидрологии. Исследования водного баланса формировались ещё советской научной школой и заложены в трудах основоположников гидрологии суши и инженерной гидрологии Авакяна А.Б. [1, 4], Аполлова Б.А. [9], Бабкина В.И. [14, 15], Бефани Н.Ф. [22], Булавко А.Г. [33], Вуглинского В.С. [50], Калинина Г.П. [91, 92], Картвелишвили Н.А. [93], Крицкого С.Н. и Менкеля М.Ф. [103, 104, 105], Львовича М.И. [112, 113], Плиткина Г.А. [116], Ратковича Д.Я. [132], Саваренского А.Д., [143], Сванидзе Г.Г. [144], Шикломанова И.А. [40, 161] и др. Продолжены их последователями и учениками Алексеевским Е.И. [67], Асариним А.Е. [11], Блохиновым Е.Г. [23], Болговым М.В. [24], , Великановым А. Л. [36, 37], Воропаевым Г.В. [45], Гельфаном А.Н. [54], Георгиевским Ю.М. [55], Данилов-Данильяном В.И. [59], Добровольским С.Г. [62], Исмайыловым Г.Х. [45, 73], Коронкевичем Н.И. [100], Кучментом Л.С. [110], Малинином В.Н. [114], Пряжинской В.Г. [130], Резниковским А.Ш. [56, 139], Рождественским А.В. [141], Ратковичем Л.Д. [78, 133], Фроловой Н.Л. [8, 150], Фроловым А.В. [151, 152], Храновичем И.Л. [59], Е.В.Цветковым [159] и др.

Уровень развития воднобалансовых исследований во многом определяется развитием таких разделов науки о Земле, как гидрология (особенно ее разделов гидрология суши, инженерная гидрология, моделирование гидрологических процессов, включая элементы водного баланса), так и теории водохозяйственных расчетов, включая современные информационные и компьютерные технологии. Для такого развития необходимо выполнение двух факторов. Первым фактором, определяющим развитие воднобалансовых исследований, является уровень развития и организации всего народного хозяйства страны. С повышением эффективности всего народного хозяйства в целом увеличивается эффективность применяемых воднобалансовых методов по обоснованию управления природными режимами водных объектов. Вторым фактором развития воднобалансовых исследований является уровень развития смежных дисциплин в области науки о Земле. Очевидно, что обоснованная методика для оценки ЭВБ речного бассейна может быть разработана только на основе правильного представления о физической сущности процессов взаимодействия гидросферы с атмосферой, с учетом антропогенных факторов, оказывающих влияние на формирование речного стока, испарения с поверхности речного водосбора, изменение бассейновых влагозапасов и т. п. Здесь огромное значение имеет развитие математики, физики, химии, информационных и компьютерных технологий. Основные закономерности в изменении ЭВБ, особенно в изменении режима рек и водоемов во времени могут быть установлены на основе анализа данных гидрометеорологических наблюдений за прошлый период. Поэтому, достоверность и эффективность оценки ЭВБ смогли возникнуть только после накопления значительных материалов гидрометеорологических наблюдений и выявления на их основе закономерности движения и распределения влаги на водосборной площади речного бассейна.

Историю развития воднобалансовых исследований условно можно разбить на нескольких этапов, начиная с процесса использования водных ресурсов рек, таких как Янцзы, Хуанхэ, Ганг, Инд, Нил, Тигр и Евфрата, Аму-Дарья и Сыр-Дарья народами древних цивилизаций до настоящего времени. Наибольший интерес на наш взгляд представляют следующие этапы: первый этап – начало XX века – 60-е

годы XX века и второй этап – 60-е годы XX века – настоящее время. Накопленные знания об элементах водного баланса, особенно о режиме водных объектов, и необходимая потребность управления природным режимом водных объектов способствовало формированию уже в начале XX века существованию научных представлений о том, как происходит процесс влагооборота воды на планете (рисунок 1.1) [33, 116].

В специальных работах И.А. Федосеева, М.И. Львовича, В.Г. Андреенова, М.А. Великанова, Д.Л. Соколовского и в ряде других работ [7, 35, 113, 147, 148, 149] достаточно подробно изложено развитие исследований в области круговорота воды в природе и создания учения о водном балансе, что освобождает нас от необходимости подробно останавливаться на этом вопросе и соответственно, основное внимание сосредоточим на развитии гидрологического цикла, который обеспечивает научную основу для прогнозирования речного стока и управления природными режимами водных объектов.



Рисунок 1.1 – Круговорот воды в природе

Начальный этап воднобалансовых исследований связан с математическим описанием процесса круговорота воды. Впервые в 1884 г. математическую трехчленную модель водного баланса сформулировал А.И. Воейков применительно к Каспийскому морю [42], а для речного бассейна в 1896 г. записал венский географ А. Пенк [170]. Согласно Пенку, модель водного баланса для среднего многолетнего годового периода состоит из трех членов и включает в себя среднемноголетнюю годовую величину осадков, испарения и речного стока. В 1904 г. в трехчленное уравнение водного баланса Е.В. Оппоков добавил четвертый параметр, который учитывал накопление и расходование влаги в речном водосборе, что вошло в мировую литературу под именем уравнения Пенка – Оппокова [128]. Однако взгляды Пенка и Оппокова на процесс формирования бассейновых влагозапасов принципиально различаются. Пенк рассматривал, что динамика влагозапасов водосбора замыкается в пределах одного года. В отличие от этого Оппоков показал, что процесс формирования бассейновых влагозапасов в многолетнем разрезе непрерывен и в физическом смысле состоит в переходе влагозапасов из одного года в другой и формируется в речном водосборе в виде избытка или в виде дефицита и существенно влияет на соотношения между элементами водного баланса в рамках отдельного года. В дальнейшем большой вклад в развитие воднобалансовых исследований внес Э.М. Ольдекоп, он обобщил сведения об элементах водного баланса многих речных водосборов России и Западной Европы, дал анализ зависимости стока и испарения от осадков в различных физико-географических условиях и обосновал формулу для расчета испарения с речных водосборов [60].

В начале XX века, особенно после Великой Октябрьской революции, начинается этап, который характеризуется сооружением водохранилищ на реках Волге, Доне, Днепре, орошением и обводнением Заволжья, Арало-Каспия, Южной Украины и Северного Крыма, и другими водохозяйственными мероприятиями, которые коренным образом повлияют на режимные характеристики крупных, средних и малых рек. Сток рек станет более равномерным, весенние паводки уменьшаются, летом реки станут более полноводными; речные русла изменяют

свою извилистость, исчезнут многие острова и отмели; грунтовые воды значительно изменяют свой режим; увеличиваются испарения с поверхности водосборной территории; уменьшается приток речных вод к замыкающему водоему и т. п. Соответственно, существующая эмпирическая теория по изучению закономерности ЭВБ не обеспечила требования, связанные с бурным развитием промышленного и водохозяйственного строительства. Теоретический и экспериментальный подход к исследованию речного стока и испарения во многом вытеснил чисто эмпирические подходы прошлого. Этот период характеризуется новыми исследованиями в области воднобалансовых наук, связанных с разработкой гидрологических прогнозов [9, 10, 22] и созданием теории управления природными режимами водных объектов [103, 104, 105, 143]. В 1919 году был создан Российский (сейчас Государственный) гидрологический институт (ГГИ), а в 1929 году – Гидрометеорологическая служба. Создание этих служб позволило успешно развиваться теоретическим и практическим направлениям гидрологии суши и инженерной гидрологии. Проектирования крупных гидроэлектростанций, платин и водохранилищ на равнинных и горных реках, а также развитие ирригации в южных районах страны привели к необходимости усиления воднобалансовых исследований с целью гидролого-водохозяйственного обоснования по созданию водохозяйственных систем (ВХС) речных бассейнов [9, 10, 43, 103, 104, 105, 116, 143].

Успехи в начале XX века в науке о Земле обеспечили лучшее понимание природы гидрометеорологической взаимосвязи ЭВБ и круговорота воды в природе. Развитию натурной и экспериментальной гидрологии способствовало сначала развитие генетических методов оценки формирования речного стока [10]. Высокий уровень развития промышленности, водоснабжения, сельского хозяйства, гидроэнергетики, гидротехнического строительства и судоходства в 50-е годы дал мощный толчок развитию воднобалансовых исследований, что послужило развитию стохастического направления. Характерным для этого периода является накопление материалов гидрометеорологических наблюдений и развитие

генетических и стохастических методов расчета инженерной гидрологии [1, 9, 20, 22, 55, 56, 92, 93, 103, 126, 139, 144, 161].

Развитие теории управления природными режимами водных объектов требовало построить модели речного стока с наибольшим приближением к натурным данным путем сохранения основных статистических закономерностей. С этих позиций в исследованиях многолетних колебаний гидрологических процессов большую роль играло использование гидрологами цепей Маркова. Введение в область гидрологических расчетов аппарата цепей Маркова является заслугой С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля [104], которые еще в 1946 году писали, что к числу достоинств этого аппарата относится сравнительная простота количественной оценки анализируемых связей, а также возможность непосредственного практического использования при воднобалансовых исследованиях. В это же время, ими разработано и применено в воднобалансовых исследованиях речного стока трехпараметрическое гамма распределение. Использование теории цепей Маркова сыграло исключительно важную роль в развитии методов инженерной гидрологии [23, 105]. Дальнейшее развитие применения теории цепей Маркова нашло свое отражение в работе М.В. Болгова, И.О. Сарманова и О.В. Сарманова [24].

Накопленные знания о режиме водных объектов у нас и за рубежом в первой половине XX века стали основой для формирования научных представлений о влагообороте воды на планете. В этот период была написана работа Э.А. Брикнера, «Баланс круговорота воды на поверхности Земли» (1905 г.) [26].

Большой вклад в развитие методологии водного баланса ввел сначала Е.А. Гейнц [53], а позже академик Г.Н. Высоцкий в работах [51, 52]. В структуру водного баланса включены такие составляющие как поверхностных сток, формирующийся за счет таяния снега в период половодья и в период межени. Большой вклад в развитие методики воднобалансовых исследований был внесен В.Г. Глушковым [57], М.А. Великановым [34]. Влиянию агротехнических, лесохозяйственных и прочих мероприятий на структуру водного баланса речных бассейнов посвящены работы Львовича М.И. и его учеников [113]. Важный вклад

в развитие воднобалансовых исследований внесли М.И. Будыко [27, 28] и А.И. Будаговский [31]. Им принадлежит развитие воднобалансовых исследований в части совместного решения уравнений водного и теплового балансов для оценки испарения и запасов влаги в почве. Работы Пенка, Оппокова, Гейнца и Ольдекопа, помимо теоретического значения, открыли путь к практическому использованию. Первые попытки практического использования для определения среднегодового стока в зависимости от метеорологических данных (осадков, дефицита влажности и температуры воздуха) были осуществлены А. Пенком [170] и Э.М. Ольдекопом [127].

После середины XX века и до настоящего времени наступил этап научной революции в развитии воднобалансовых исследований. На этом этапе почти завершилось строительство основных крупных водохозяйственных объектов России. Соответственно, созданы сложные ВХС, которые включали в себя каскады водохранилищ, позволяющие практически решать масштабные задачи преобразования природы, особенно природные режимы водных объектов. Следует отметить, что функционирование ВХС страны были направлены на получение дешевой электроэнергии, создание единой глубоководной сети водного транспорта, орошение и обводнение огромных территорий в Заволжье, Прикаспии, Северном Кавказе, Южной Сибири, Средней Азии и др.

В этот период основные усилия ученых направлены на повышение точности измерения составляющих ЭВБ и усовершенствование методов их расчета. Одновременно проводятся большие работы в области экспериментальных исследований. Интенсивное вмешательство человека в природные и в том числе гидрологические процессы во многих случаях требуют учета в уравнении водного баланса дополнительных элементов. К таким элементам, в частности, относятся переброска стока, забор и сброс поверхностных и подземных вод в пределах рассматриваемого участка суши, искусственное регулирование речного стока водохранилищами и др.

В условиях отсутствия достоверных данных о предстоящем ходе колебаний речного стока потребовалось использование в отечественных и зарубежных

работах метода математического (статистического) моделирования гидрологических рядов для решения различных прикладных задач в области водохозяйственного проектирования. В результате, по данным гидрометеорологических наблюдений отыскиваются обобщенные вероятностные характеристики процесса речного стока, по которым разыгрываются реализации речного стока большой длительности [144, 172]. Реализация этого подхода и разработка рациональных методов моделирования стали возможным лишь после появления новых методов прикладной математики и современных компьютерных технологий. Проблема оказалась настолько актуальной, что за последующие годы были проведены несколько международных симпозиумов, посвящённых применению методов статистического моделирования в гидрологии (Варшава, 1971 г., Братислава, 1975 г.).

Начиная с 60-х годов прошлого века в воднобалансовых исследованиях широкое распространение получили детальные физико-математические модели. Начиная с концептуальных простых моделей типа «приток-накопление-отток», основанных на рассмотрении водного баланса территории с использованием эмпирических и полуэмпирических уравнений [13, 33) и кончая, сложными моделями, имитирующими гидрологические процессы посредством численного решения уравнений диффузии и кинематики [9, 22, 62, 104, 110, 124].

В 1974 г. Юнеско опубликовало «Международное руководство по исследованиям и практике методов расчета водных балансов» [122], в котором обобщен мировой опыт составления водных балансов речных водосборов. Следует отметить, что в зарубежных странах в это время используются схемы Тюрка, Торивейта и Мазера или российских исследователей [112, 119]. Схема Тюрка для расчета водного баланса широко распространена во Франции [14]. По методу Торитвейта и Мазера оценивается дефицит влаги, запас влаги и избытка влаги в почве. Схема Торитвейта и Мазера распространена в Испании, США и ряде стран Африки [14]. Из зарубежных работ в этот период, также интерес представляли работы А. Хазена и С.Е. Садлера [168, 172]. В работе С.Е. Садлера впервые была попытка моделирования гидрологических рядов способом случайной выборки

[172]. Обзор развития зарубежных работ в области воднобалансовых исследований и применения их результатов для обоснования водохозяйственных проектов достаточно полно приводится в работах института системного анализа JJASA (Laxenburg) [173].

В этот период большой вклад в развитие воднобалансовых исследований внесли гидрометеорологические обсерватории (ГМО) и государственный гидрологический институт (ГГИ) [48, 121].

В странах существует сеть опорных воднобалансовых станций, направленных на изучение водных ресурсов [140]. Здесь следует отметить, что у нас в стране в настоящее время действуют такие воднобалансовые станции, как: Нижнедевицкая ВБС, ВБС Каменная Степь, Подмосковная ВБС и Валдайская научно-исследовательская гидрологическая лаборатория (ВНИГЛ) [125].

Учреждениями Росгидромета накоплен большой фактический материал по стоку рек и водному режиму озер и водохранилищ [32, 40, 41, 50, 55]. К числу основных изданий, содержащих сведения о стоке воды, наносах, зимних режимах и об уровнях воды, полученные в пунктах гидрологических наблюдений, относятся гидрологические ежегодники и др. Имеется множество данных гидрометеорологических наблюдений, осуществляемых разными ведомствами РФ, которые можно использовать для оценки точности ЭВБ речных водосборов и для прогнозирования их изменения во времени с учетом климатических и антропогенных факторов.

Наблюдается сезонная и межгодовая изменчивость ЭВБ в речных бассейнах в многолетнем периоде, включая их прогнозирование как в ближайшее время, так и в будущем, настолько сложна, особенно для средних и больших речных бассейнов, что требует высококвалифицированного подхода, связанного с обобщением и использованием накопленного отечественного и международного опыта в области изучения всего гидрологического цикла. Здесь следует признать, что у нас до сих пор отсутствует систематическое изучение, обобщение и оценка этого опыта [50]. Учитывая вышесказанное, второй этап развития воднобалансовых исследований характеризуется применением методов,

основанных на использовании ЭВМ и современных методов обработки информации, ориентированных на математическое моделирование сложных явлений и процессов. В свете сказанного особый интерес представляет монография В.И. Бабкина В.С., Вуглинского [14], где изложены современные методы исследований. Ценность этих исследований заключается в том, что авторы наряду с методическими вопросами впервые смогли осуществить их проверку на массовом материале многих речных бассейнов, расположенных в различных районах России. Эта монография дает объективное представление о современном состоянии воднобалансовых исследований и изученности водного баланса речных бассейнов.

Во второй половине XX века в воднобалансовых исследованиях происходила коренная перемена. Исследователи стали переходить от изучения отдельных элементов водного баланса к комплексному изучению всех компонентов водного баланса как единого гидрологического цикла, который включает в себя атмосферу, землю, зону аэрации и грунтовые воды [13, 24, 32, 33, 45, 50, 55, 59, 62, 67, 73, 92, 100, 110, 111, 114, 123, 124]. В воднобалансовых исследованиях начали широко применять стохастические методы и соответственно, в гидрологии сформировалось новое направление стохастическая гидрология [22, 24, 41, 62, 67, 93, 104, 105, 110, 114, 123, 124, 132, 159.]. При наличии стохастического характера колебаний в водных потоках, а также в других элементах водного баланса, возникает необходимость вероятностного описания их режима как при исследовании природных закономерностей, так и при решении задач управления природными режимами водных объектов. Здесь особый интерес представляют работы С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля [104, 105], Д.Я. Ратковича [132], Г.Г. Сванидзе [144], Н.А. Картвелишвили [93], и их последователей Алексеевского Н.И. [8, 67], Блохинова Е.Г. [23], Болгова М.В. [24, 135, 166], Добровольского С.Г. [63], Евстигнеева В.М. [66], Коронкевича Н.И. [100, 101], Христофорова А.В. [156, 157], Фроловой Н.Л. [8, 150], Фролова А.В. [151, 152] и др. В этих работах был развернут широкий круг задач прикладной гидрологии. В частности, были развиты исследования многолетних колебаний ЭВБ, особенно характер колебаний речного стока, методика составления и интерпретации результатов водного и

водохозяйственного балансов, теория многолетнего и сезонного регулирования речного стока, методы вероятностного предвидения ЭВБ, методы моделирования рядов составляющих водного баланса и др. Следовательно, модели колебаний ЭВБ могут служить основой управления природными режимами водных объектов.

Обзор зарубежных работ по воднобалансовым исследованиям применительно к обоснованию развития и функционирования больших ВХС речных бассейнов изложены в работе [126].

В связи с ростом масштабов и способов использования водных ресурсов увеличивающимся населением и производственными объектами в настоящее время альтернативой концепции стационарности и квазистационарности (цикличности) колебания климата и ЭВБ суши выступает концепция антропогенно-обусловленного глобального изменения климата [25, 65, 61, 69, 95, 162, 164, 171, 49]. Таким образом, оценки закономерностей изменения ЭВБ речных бассейнов России, особенно таких как бассейн р. Волги за достаточно длительный период гидрометеорологических данных наблюдений (более 100 лет) необходимо проводить в сопряжении (сравнении) с его формирующими климатическими факторами.

Огромный научный и практический интерес для исследований в области водного баланса имеют работы Г.В. Воропаева, Г.Х. Исмайылова, В.М. Федорова и их учеников в области развития воднобалансовых исследований применительно к бассейнам рек Волги, Дона европейской части России и рек Сыр-Дарья и Амударья – Центральной Азии [45, 70, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83]. В этих работах последовательно развивается оценка ЭВБ большого речного бассейна. С целью новой оценки и анализа взаимосвязи основных компонентов водного баланса, авторы исходили из единства процессов круговорота воды в системе «атмосфера-водосбор-река-водоем». Для бассейна реки Волги была осуществлена оценка годовых и сезонных параметров атмосферных осадков, суммарного испарения и трансформации влагозапасов за период с 1881/1882 по 2000/2001 гг. [73, 87, 88], а затем для 1914/1915 – 2020/2021 годов [84, 86].

Соответственно, в рамках данной диссертационной работы ставится и решается задача необходимости совершенствования методики водного баланса, которая включает в себя расчет трудноизмеряемых составляющих, таких как годовые и сезонные значения суммарного испарения воды с поверхности водных объектов и их бассейновых запасов за определенный период времени с учетом нестационарности формирования ЭВБ, в целях получения наиболее точных данных о речном стоке и атмосферных осадках. В процессе разработки было принято решение о создании информационно-аналитической системы, включающей в себя многолетние данные о многолетних гидрометеорологических наблюдениях для речного бассейна. Проведение комплексного сравнительного анализа ЭВБ с целью выявления наличия тенденций в их динамике многолетних колебаний, однонаправленных или монотонных изменений их средних, осуществление идентификации притока речных вод в зависимости от возможных сценариев изменения климата. Осуществить прогнозирование притока к замыкающему створу речного бассейна как в ближайшее время, так и в отдаленной перспективе, учитывая сценарии изменения климата.

Объектом исследования выступает бассейн р. Волги как модель природной системы для изучения закономерностей формирования составляющих элементов водного баланса во времени и при нестационарности современной климатической системы.

1.2. Структура и генетические основы формирования элементов водного баланса

Изучение водного баланса базируется на использовании закона сохранения баланса вещества в природе [14, 33]. Это означает, что для любого объема в течение любого периода времени разность между общим приходом и расходом воды равна изменению ее запаса в этом объеме. Таким образом, водный баланс – это отражение закона сохранения вещества, количественное выражение круговорота воды на

Земле (рисунок 1.1.), которое выражается уравнением водного баланса. Уравнение водного баланса записывается, либо в единицах объема (км^3), либо слоя воды (мм).

Влагооборот на земном шаре осуществляется водообменом между сушей, мировым океаном и атмосферой (рисунок 1.2.). В результате круговорота воды, все воды на земле находятся в постоянном движении.

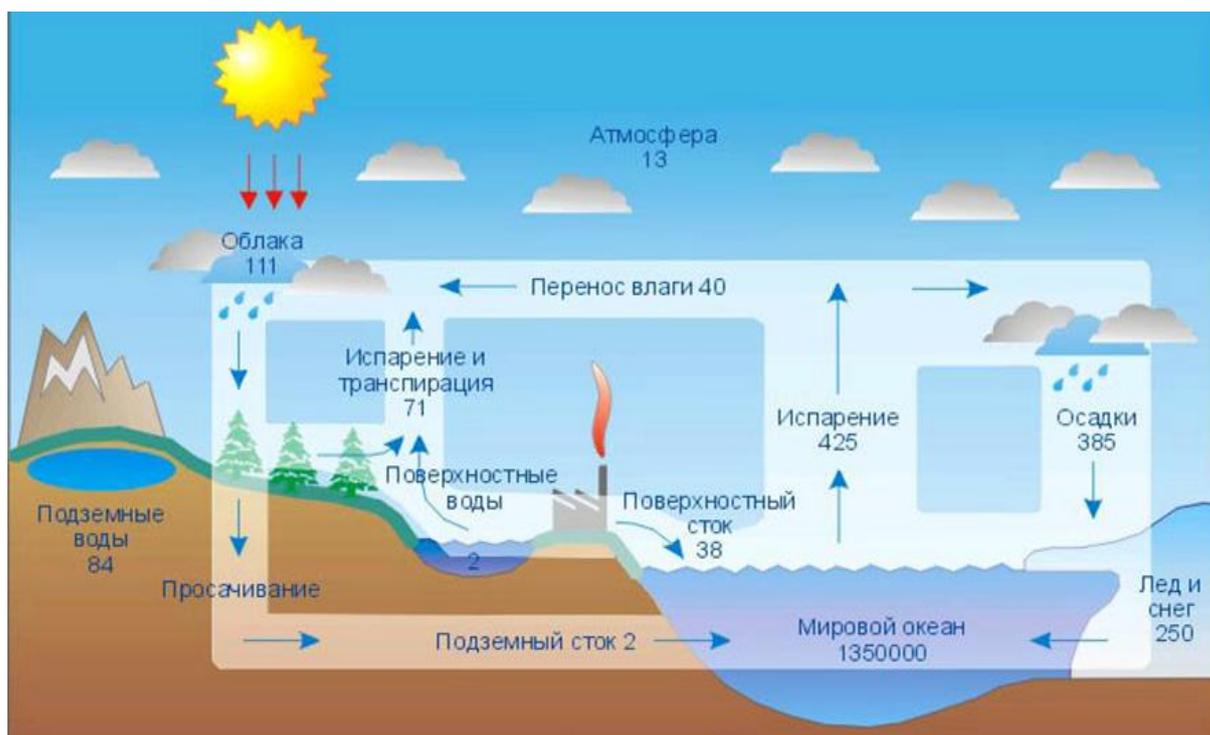


Рисунок 1.2 – Схема мирового водного баланса

Общий объем гидросферы равен примерно 1800 млн. км^3 . Большая часть воды 1370 млн. км^3 – приходится на мировой океан (76 %), 340 млн. км^3 (19 %) - на долю связанной воды земной коры, 90 млн. км^3 (5 %) приходится на воды суши и приблизительно 13 тыс. км^3 воды в виде пара находится в атмосфере.

По мировому водному балансу установлено, что с океана ежегодно испаряется в среднем $502 \text{ тыс. км}^3/\text{год}$ воды, а возвращается в океан в виде атмосферных осадков в среднем $458 \text{ тыс. км}^3/\text{год}$ и с материкового стока в среднем $44,2 \text{ тыс. км}^3/\text{год}$. На поверхность суши ежегодно выпадает в среднем $119 \text{ тыс. км}^3/\text{год}$ атмосферных осадков, которые затрачиваются на испарение суши – $75 \text{ тыс. км}^3/\text{год}$ и на формирование материкового стока в океан – $44,2 \text{ тыс. км}^3/\text{год}$ [67].

Наилучшим представлением различных форм воды Земли является уравнение водного баланса, которое хорошо видно из рисунке 1.2.

Уравнение водного баланса применительно для выделенных видов влагооборота в природе:

Для малого круговорота влаги в пределах океана

$$E_0 = P_0 + R_c \quad (1.1)$$

Для большого круговорота влаги

$$E_c + R_c = P_c \quad (1.2)$$

Для бессточных областей

$$E_{\sigma} = P_{\sigma} \quad (1.3)$$

где: E_0 , E_c , E_{σ} - среднееголетние значения испарения с поверхности Мирового океана, периферийных и бессточных областей суши; P_0 , P_c , P_{σ} - среднееголетние значения атмосферных осадков над поверхностью соответственно Мирового океана, периферийными и бессточными областями суши; R_c - среднееголетнее значение речного стока. В исследовании размерность значений атмосферных осадков, речного стока и испарения применяется мм/год.

Водный баланс речного бассейна. Осадки, выпадающие на поверхность суши распределяются на сток, испарение и инфильтрацию. Эти элементы изменяются во времени и в пространстве, но для какого – то отрезка времени и какого-то выделенного объема суши, так, например, для речного водосбора можно составить уравнение водного баланса, исходя из количества вод, поступающих и уходящих из этого объема. Гидрологическая интерпретация закона сохранения материи состоит в том, что для всякого произвольного ограниченного пространства количество, поступающей в него и уходящей из него влаги за некоторой период времени равняется изменению влаги в этом пространстве. Соответственно, водный баланс складывается из постоянно меняющихся во времени и пространстве элементов, поэтому принято его рассматривать как динамическую систему взаимосвязанных процессов (элементов), непрерывно изменяющихся во времени.

Для того, чтобы использовать уравнения водного баланса для проведения оценки и анализа водных ресурсов рек, следует применять некоторые упрощения. Соответственно этому выделенный объем сверху ограничивают контуром поверхностного водораздела площадью, равной F , внизу – некоторой поверхностью, лежащей на определенной глубине, по возможности совпадающей с водоупором, и с боков ограниченной цилиндрической поверхностью (рисунок 1.3). Все расходные и приходные элементы водного баланса, приходящие к выделенному объему за определенный интервал времени T : P – суммарные атмосферные осадки; E_2 – испарение; E_1 – конденсация водяного пара в атмосфере; Q_1 и Q_2 – величины притока и оттока воды из объема русловым потоком; W_1 и W_2 – значения поступления и оттока воды через боковую поверхность; V_1 и V_2 – запасы подземных и поверхностных вод в начале и конце интервала времени T ; J_1 и J_2 – значения притока и оттока между зонами водонасыщения и нижерасположенными водоносными горизонтами.

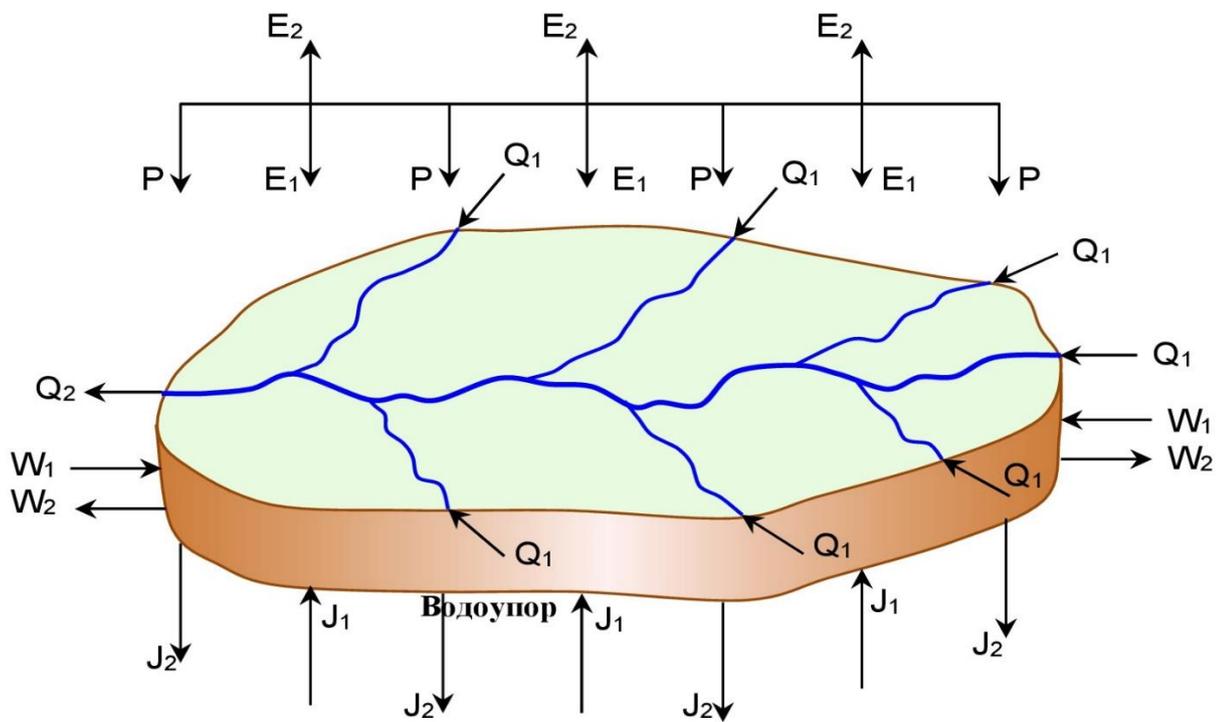


Рисунок 1.3 – Графическое представление элементов водного баланса

Тогда уравнение водного баланса можно представить в следующем виде:

$$P = (Q_2 - Q_1) + (E_2 - E_1) + (W_2 - W_1) + (V_2 - V_1) + (J_2 - J_1) \quad (1.4)$$

Если обозначить $(Q_2 - Q_1) = Q$, $(E_2 - E_1) = E$, $(W_2 - W_1) = W$, $(V_2 - V_1) = V$, $(J_2 - J_1) = J$, тогда уравнение (1.4) примет более компактный вид:

$$P = Q + E + W + V + J \quad (1.5)$$

Это – общее уравнение водного баланса выделенного объема суши. Составляющие P , Q , E являются положительными, остальные могут быть либо положительными, либо отрицательными. Данному члену, являющемуся первым в правой части уравнения соответствуют водные ресурсы, которые формируются в пределах выделенного объема, второе составляющее – это суммарное испарение с выделенной поверхности, третье – боковое перемещение воды; четвертое – изменение запасов воды, оно представлено уравнением в виде (1.6), пятое – водообмен между выделенным объемом и слоем ниже водоупора

$$V = V_{\text{подз}} + V_{\text{сн}} + V_{\text{ак}} \quad (1.6)$$

где: $V_{\text{подз}}$ – изменение запаса между верхней и нижней поверхностями выделенного объема, $V_{\text{сн}}$ и $V_{\text{ак}}$ – на верхней поверхности объема. Первая часть относится к изменению запаса подземных вод, вторая – запасы воды в снежном покрове могут изменяться и третья – к изменению запасов в естественных водоемах на поверхности выделенной площади F .

Уравнение (1.4) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} [P + Q_{\text{переб.,п}} + Q_{\text{сбр.}}] - [Q_{\text{пов.}} + Q_{\text{подз.}} + Q_{\text{заб.}} + Q_{\text{переб.о}} + E] = \\ = \Delta V_{\text{сн.ледн.}} + \Delta V_{\text{оз.}} + \Delta V_{\text{вдхр.}} + \Delta V_{\text{бол.}} + \Delta Z + \Delta D \pm \eta \end{aligned} \quad (1.7)$$

где: P – суммарные атмосферные осадки; $Q_{\text{переб.,п}}$ – переброска воды из других бассейнов; $Q_{\text{сбр.}}$ – воды, поступающие в реку после хозяйственного использования (водоотведения или стока возвратных вод из сельскохозяйственных территорий); $Q_{\text{пов.}}$ и $Q_{\text{подз.}}$ – соответственно значения поверхностного и подземного речного стока в замыкающем створе реки; $Q_{\text{заб.}}$ – забор воды из реки

на хозяйственные нужды; $Q_{\text{переб.о}}$ – переброска воды в другие бассейны; E – суммарное испарение с учетом конденсации водяного пара в атмосфере; $\Delta V_{\text{сн.ледн.}}$ – изменения запасов воды в снеге, ледяной корке, наледях и ледниках; $\Delta V_{\text{оз.}}$, $\Delta V_{\text{вдхр.}}$ и $\Delta V_{\text{бол.}}$ – изменения запаса воды соответственно в озерах, в водохранилищах, в болотах; ΔZ – изменение влагозапасов в зоне аэрации бассейна; ΔD – изменение запасы воды в дренируемых рекой водоносных слоях бассейна; η – остаточный член (невязка) водного баланса.

Представленная запись уравнения водного баланса (1.7) применительно к конкретным задачам может меняться как в сторону сокращения, так и в сторону увеличения числа его членов с учетом характера территории, физико-географических особенностей речного водосбора, хозяйственной деятельности, расчетного периода, фазы водности и т.д.

Для больших бассейнов равнинных рек уравнение (1.7) может упроститься:

$$P = R + E \pm \Delta V \quad (1.8)$$

где: ΔV – изменение бассейновых влагозапасов за период гидрологического года, причем $\Delta V = V_{\text{к}} - V_{\text{н}}$; $V_{\text{к}}$ и $V_{\text{н}}$ – величины бассейновых влагозапасов на начало и конец периода времени. При этом если $\Delta V > 0$ – происходит сработка бассейновых влагозапасов, если $\Delta V < 0$ – наполнение. В среднем многолетие $\pm \Delta V = 0$; R – речной сток.

Водный баланс участка суши. Водный баланс – это равенство приходных и расходных составляющих процесса круговорота воды за расчетный интервал времени. Особое значение приобретает в настоящее время, когда под влиянием экономической деятельности человека не только изменяется естественный режим водных объектов, но и происходит изъятие части стока.

Если результаты уравнения (1.8) просуммировать за n лет и вывести среднее, то мы получим, что $\pm \Delta V = 0$, тогда уравнение (1.8) примет следующий классический вид:

$$\bar{P} = \bar{E} + \bar{R} \quad (1.9)$$

где: \bar{P} , \bar{E} , \bar{R} – соответственно среднеголетние величины (нормы) атмосферных осадков, испарения и стока. При этом аккумуляционный член $\pm\Delta V$ с увеличением длительности периода наблюдений $n \rightarrow \infty$ стремится к нулю по сравнению с другими членами, так как этот член уравнения ΔV имеет разные знаки. Уравнение (1.9) справедливо лишь при отсутствии водообмена. Это хорошо видно при написании уравнения водного баланса применительно к отдельным участкам суши. Соответственно, необходимо представить уравнение водного баланса в дифференциальном виде, включая баланс влаги на поверхностной зоне (А), зоне аэрации (Б) и зоне насыщения (В). В соответствии с общими представлениями о влагообмене между сушей и атмосферой, а также нижерасположенными слоями почве-грунтов (рисунок 1.4) получаем уравнение водного баланса:

а) поверхностная зона

$$P + E_1 + R_{н.лов.} + A_1 = E_2 + R_{от.лов.} + A_2 \quad (1.10)$$

б) зона аэрации

$$A_2 + V_k - V_n + P_1 = A_1 + P_2 \quad (1.11)$$

в) зона насыщения

$$R_{н.подз.} + P_2 + U_1 = R_{от.подз.} + P_1 + U_2 \quad (1.12)$$

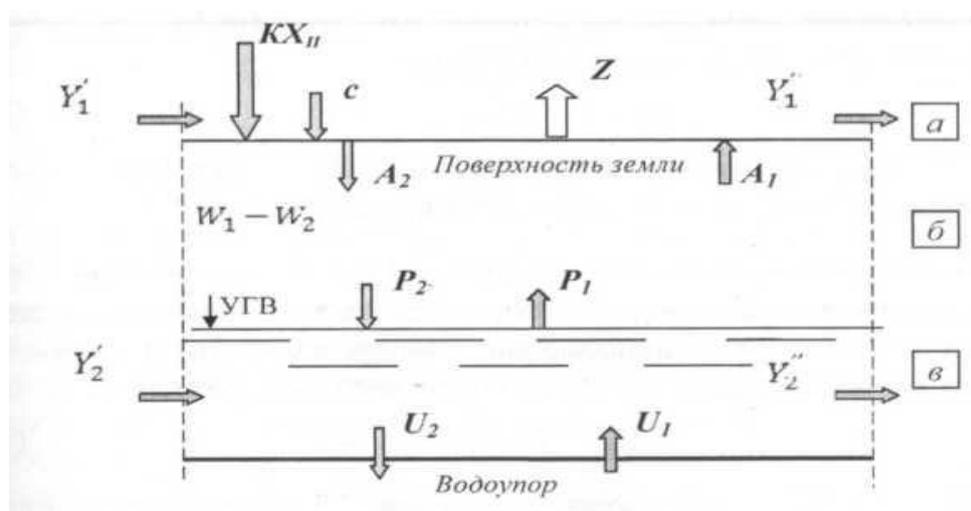


Рисунок 1.4 – Схема влагообмена между сушей и атмосферой и нижерасположенными слоями почве-грунтов

Почленное суммирование приходных и расходных статей уравнения дает итоговое уравнение водного баланса:

$$P + E_1 + (R_{n.пов.} + R_{n.подз.}) + (V_k - V_n) = E_2 + (R_{от.пов.} + R_{от.подз.}) + (U_2 - U_1) \quad (1.13)$$

Учитывая, что член уравнения (1.13) $(U_2 - U_1)$ пренебрежимо мал, окончательный вид уравнения (1.13) такой

$$P + E_1 + (R_{n.пов.} + R_{n.подз.}) + (V_k - V_n) = E_2 + (R_{от.пов.} + R_{от.подз.}) \quad (1.14)$$

где: P – атмосферные осадки; E_1 – приход влаги, связанный с конденсацией; E_2 – суммарное испарение; $R_{n.пов.}$ и $R_{от.пов.}$ – приток и отток поверхностных вод; $R_{n.подз.}$ и $R_{от.подз.}$ – приток и отток грунтовых вод; V_k и V_n – изменение почвенной влаги в зоне аэрации; A_1 и A_2 – влагообмен между зоной аэрации и поверхностью; P_1 и P_2 – влагообмен между зоной аэрации и насыщения; U_1 и U_2 – влагообмен между зоной насыщения и горизонтами ниже водоупора.

1.3. Методика количественного определения основных составляющих ЭВБ

Атмосферные осадки. Основным измеряемым исходным материалом для расчета ЭВБ речных бассейнов за многолетний период являются осадки и речной сток. Данные наблюдений указанных составляющих водного баланса публикуются в виде гидрологических и метеорологических ежегодников, бюллетеней и других изданий [44].

Наиболее важные факторы, влияющие на уровень увлажнения речного водосбора, определяются режимом атмосферных осадков. О влиянии атмосферных осадков на формирование водного баланса речной системы достаточно подробно освещено в фундаментальных работах А.Г. Булавко [33], В.И. Бабкина и В.С. Вуглинского [14] и Г.А. Плиткина [116]. Здесь же рассмотрим лишь некоторую специфику определения режима атмосферных осадков как важнейших характеристик для увлажнения территории речного водосбора и играющих важную роль в определении точности и надежности результатов водного баланса речного бассейна.

Как видно, из уравнений, приведенных выше (1.5), (1.8) и др. атмосферные осадки – основной элемент приходной части водного баланса. Атмосферные осадки неразрывно связаны с валовым увлажнением речного водосбора. Осадки являются также основным источником формирования поверхностного и подземного стока. В связи с этим их изучение приобретает особую роль в воднобалансовых исследованиях.

Прежде всего отметим, что по характеру выпадения и роли в водном балансе все виды атмосферных осадков делятся на жидкие и твердые. Жидкие осадки, выпадающие главным образом в виде дождя, вступают в гидрологический процесс сразу же после наступления водосбора. Поэтому жидкие осадки играют существенную роль в формировании водного баланса в момент их выпадения. Твердые осадки выпадают в виде снега. Поэтому участие этого вида осадков в формировании водного баланса вступает с достаточно длительными запаздыванием. Соответственно, их поступление в гидрологический процесс зависит от термического режима окружающей среды, которое определяется ходом снеготаяния и водоотдачей водосбора. Известно также, что кроме вертикальных осадков, выпадающих из облачных систем, в увлажнении водосбора участвуют и осадки, образующиеся путем конденсации водяного пара на растительном покрове. «Горизонтальные осадки», осаждающиеся на поверхность земли, особенно в лесах также необходимо учитывать в гидрологических процессах. Из всего вышеперечисленного становится ясным, что результаты измерений современных осадкомерных приборов не отражают действительного количества влаги, поступающей на водосбор и участвующей в формировании водного баланса речного бассейна. В связи с этим А.Г. Булавко предлагает следующие классификации осадков:

- наблюдаемые осадки (P_n) – осадки, уловленные измерительными приборами;
- приведенные (действительные) осадки (P_n) – осадки $P_n = k_n P_n$, где k_n – коэффициента приведения;

- задержанные осадки (P_3) – часть приведенных (действительных) осадков, задержанных растительным покровом;
- активные осадки (P_a) – подавляющая часть атмосферных осадков на поверхности водосбора, является основной $P_n - P_3$.

Среднее количество осадков определяется по формуле

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (1.15)$$

Либо вычисляются как средневзвешенное количество осадков из значений, полученных на метеорологических станциях

$$\bar{P} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n P_i f_i \quad (1.16)$$

где $F = \sum_{i=1}^n f_i$ – площадь речного бассейна; f_i – частная площадь, на которую распространяются наблюдения i -ой осадкомерной станции.

На сети метеорологических станций Российской Федерации наиболее распространенными осадкомерами является осадкомер Третьякова, ГГИ-3000 и ГГИ-500. Относительно наилучшим осадкомером в настоящее время считается осадкомер Третьякова, сконструированный В.Д. Третьяковым в 1941 году. Осадкомер Третьякова обладает лучшими аэродинамическими условиями обтекания ветровым потоком. Начиная с 1948 по 1950 гг. на сети метеостанций и постов СССР дождемеры Нифера был заменены осадкомером Третьякова. Естественно, такой замен дождемерного измерительного прибора потребовал приведения данных наблюдений за прошлые годы к показаниям нового прибора.

В настоящее время ведутся экспериментальные исследования измерения осадков с помощью радиолокаторов. Это открывает возможности более надежного изучения пространственного распределения осадков по сравнению с их наземными измерениями на метеостанциях.

Речной сток. В настоящее время, при сложившихся условиях определение речного стока наиболее достоверно.

Речной сток может выражаться в виде расхода воды Q (м³/с), объема стока W (м³/год, или млн. м³/год или км³/год), модуля стока q (м³/(с.км²) или л/(с.км²)) и слоя стока h (мм/год). Характеристики стока воды связаны между собой следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} W &= qF / 10^3 = 10^3 hF / t = W / t \\ q &= 10^3 Q / F = 10^6 h / t = 10^3 W / (Ft) \\ h &= Qt / (10^3 F) = qt / 10^6 = W / (10^3 F) \\ W &= Qt = qFt / 10^3 = 10^3 hF \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

где: t – количество секунд в расчетном интервале времени.

В гидрологических расчетах широко применяют много других параметров, характеризующих гидрографические особенности речной сети и речного бассейна: площадь водосбора F (км²) и его средняя (средневзвешенная) высота H_{cp} (м); длина реки L_p (км); уклон русла I_p и водосбора I_ϵ ; густота речной сети D ; площадь озер (в относительных единицах) ($f_{оз}$), болот ($f_{б}$), леса ($f_{л}$) и других угодий.

В историческом аспекте в воднобалансовых исследованиях сложилось два направления по определению величины речного стока. Генетическое направление и статистическое направление.

Генетические методы гидрологических расчетов базируются на физических закономерностях формирования речного стока и используются для установления причинно-следственных связей развития гидрологических процессов. Генетический анализ отражает объективные законы существования воды. В настоящее время генетические методы включают в себя гидрологическую аналогию, географическую интерполяцию, метод изохрон, метод водного баланса и гидролого-гидрогеологический метод [129]. Таким образом, на основании генетических методов анализа формирования речного стока создается научная база для создания физико-математических моделей гидрологического цикла речного бассейна.

Формирование статистического направления связано со следующими обстоятельствами.

Исследование многолетних колебаний стока реки показывает, что данным колебаниям присущи некоторые особенности, которые обусловлены специфичностью гидрологических явлений, изучаемых в гидрологии [66, 93, 103, 104, 123, 132]. Формирование стока рек происходит в условиях сложного взаимодействия постоянно изменяющихся во времени и пространстве факторов, которые придают величине речного стока вероятностный характер. Влияние климатических факторов особенно сильно. В соответствии с тем, что было сказано, наряду с генетическими методами [9, 10, 22, 35, 54, 110] в гидрологии стали широко использоваться статистические методы [23, 104, 105, 123, 132, 135, 144].

Соответственно теории вероятностей и математической статистики случайных процессов для описания речного стока используется интегральный закон распределения $F(w)$ случайной величины W , которую определяют по формуле:

$$F(w) = \int_{-\infty}^w f(w)dx = \sum_{w_i < w} F(W = w_i) \quad (1.18)$$

В гидрологии распределение стока представляется функцией обеспеченности. Связь ее ординат с функцией распределения $F(x)$ такова:

$$P(w) = 1 - F(w) = \int_w^{\infty} f(w)dw = \sum_{w_i > w} P(W = w_i) \quad (1.19)$$

В практике гидрологических расчетов наибольшее распространение получили следующие типы функций распределения вероятностей: распределение Гаусса; гамма распределение; распределение Пирсона III типа; логарифмически нормальное распределение; трехпараметрическое гамма распределение С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля [23, 104, 105]. При наличии материалов наблюдений за годовыми или сезонными значениями речного стока в расчетных створах речной системы в форме исходного временного ряда осуществляется построение

интегральной аналитической или эмпирической кривой распределения (кривой обеспеченности) [85].

При расчете речного стока широко используются корреляционные связи между гидрологическими характеристиками. Корреляционные связи выражаются в форме корреляционных уравнений или уравнений регрессии, которые бывают линейными и нелинейными. Они часто применяются для приводки характеристик рядов стока к многолетним значениям или же для прогноза стока или уровней воды в нижележащих створах по данным о стоке в верхних створах. Временным рядам, организованным годовыми величинами стока свойственна, корреляционная функция $R(t_1, t_2) \neq 0$ при $t_1 \neq t_2$. Такие случайные последовательности называются цепями Маркова (часто используются простые цепи Маркова), так как условный закон распределения каждого члена этой последовательности Q_i (или W_i) зависит лишь предыдущего члена Q_{i+1} (или W_{i+1}). Простая цепь Маркова нашла широкое применение при описании многолетних колебаний речного стока [11, 23, 24, 56].

Многие гидрологические процессы протекают во времени однородно и формируются под воздействием постоянного комплекса природных и антропогенных факторов. Если в многолетнем периоде речной сток колеблется вокруг некоторого постоянного во времени среднего значения, и не обнаруживается при этом изменений ни дисперсии, ни структуры этих колебаний с течением времени, тогда такие процессы называются стационарным, т.е. их статистические характеристики не претерпевают изменений в течение определенного периода времени t . Нестационарным же процессам свойственно изменяться во времени. Может изменяться математическое ожидание или дисперсия, или автокорреляционная функция, или все одновременно. На протяжении прошлого XX века в гидрологии преобладал принцип стационарности в многолетнем колебании речного стока. Поэтому нестационарные гидрологические процессы приводили к стационарным, для чего использовались преобразования типа:

$$W(t) - m_w(t) = \Delta W(t), \quad (1.20)$$

приводящее к математическому ожиданию, равному нулю, либо

$$W(t) / m_w(t) = K(t) \quad (1.21)$$

с математическим ожиданием, равным единице.

Современное развитие гидрологических процессов в речных бассейнах России, начиная со второй половины прошлого столетия показывает, что, используя либо только генетические, либо только статистические методы не всегда удастся обеспечить высокую надёжность и точность гидрологических расчетов. Особенно это касается при определении прогноза притока с учетом возможных сценариев изменения климата. Анализ закономерностей многолетних колебаний различных гидрологических характеристик и определяющих их климатических, физико-географических и антропогенных факторов показывает, что с течением времени возможно изменение условий формирования речного стока [62, 63, 67, 69, 76, 88]. Эти изменения обусловлены как природными, так и хозяйственными факторами [65, 73, 95]. Соответственно, для повышения надежности гидрологических расчетов необходимо привлечение дополнительной информации с использованием динамико-стохастических моделей речного стока [54, 110, 89]. В отличие от предыдущих двух подходов, используемых в гидрологических расчетах, динамико-стохастические модели детально описывают (в зависимости от требований практических расчетов) формирование стока на водосборе и водных объектах и достаточно тесно увязывают характеристики речного стока с характеристиками его основных природно-хозяйственных факторов.

Испарение Одним из важных элементов расходной части уравнения водного баланса является суммарное испарение с поверхности речного водосбора. Оценка суммарного испарения применительно к речному бассейну является достаточно сложной задачей. Это объясняется тем, что определение суммарного испарения с поверхности речного водосбора связано с определением суммарного количества влаги, которая испаряется различными видами подстилающей поверхности водосбора (леса, луга, пашня, урбанизированные территории, включая все виды

населенных пунктов и др.) за период времени. Существующая сеть станций из-за большого разнообразия природных ландшафтов, определить суммарное испарение с различных подстилающих поверхностей речного водосбора не может. Существующие испарительные установки в лучшем случае могут оценить испарение лишь с небольших водосборов. Поэтому суммарное испарение в основном определяется расчетным путем, для чего часто используются различные методы и эмпирические зависимости, включая уравнение водного и теплового баланса. В настоящее время, для различных подстилающих поверхностей разработаны конкретные методики, позволяющие оценивать испарение с данного вида угодий [14, 27, 28, 29, 31, 33, 106, 107]. Наряду с испарением в речном водосборе происходит обратный процесс – конденсация. Различают конденсацию атмосферных паров на поверхность земли (роса) и почвенную конденсацию. Если количество влаги, образующееся за счет выпадения росы невелико, и составляет 1-2 % от суммарных осадков, то количество почвенной конденсации, которая пополняет запасы подземных вод может составлять от 15 % до 30 % объема инфильтрационных вод [33]. Эти процессы являются единичными звеньями теплообменных процессов и в зависимости от преобладания одного из них в природе наблюдается либо испарение, либо конденсация. Результаты воднобалансовых исследований показывают, что в естественных условиях большим преимуществом обладает процесс испарения, количественно превосходящий конденсацию во много раз. Поэтому основные усилия исследователей были направлены на изучение процесса испарения.

Физически испарение это процесс перехода воды из жидкого (или твердого) состояния в газообразное и сопровождается затратами тепла (энергии). Воднобалансовые исследования испарения рассматриваются как одно из основных составляющих водного баланса, изучение которых позволяет раскрыть генетическую взаимосвязь в гидрологическом цикле речного бассейна. В водохозяйственных исследованиях испарение с водной поверхности выступает как потери, уменьшающее полезную отдачу водохранилищ и подлежащее учету в водохозяйственных расчетах. С точки зрения почвоведов, агронома – это один из

важнейших факторов внешней среды, влияющий на интенсивность почвообразовательных процессов, определяющих условия вегетации растительных процессов.

Большое многообразие природных условий (леса, луга, пашня и др.), в которых протекает процесс испарения в речных водосборах требует необходимости различать его виды: физическое испарение со свободной поверхности рек, озер, водохранилищ и т.д., испарение из подземной части водосбора, которое включает испарение из зоны аэрации и насыщения; транспирация влаги растительным покровом; и наконец, испарение урбанизированных территорий. Таким образом, испарение, которое включает в себя составные части всех видов испарения является суммарным испарением и играет гидрологическую роль в освобождении емкости водосбора от накопленных влагозапасов, чем создает возможность для аккумуляции поступающих атмосферных осадков [31].

В воднобалансовых исследованиях выделяются две категории испарения – испарение нетто (E_n), являющееся результатом испарения лишь активных осадков, а также испарение брутто (E_b), которое включает в себя испарение с поверхности растительного покрова, задержанные осадки. Изучению каждого из рассмотренных видов испарения посвящено большое количество, отличающихся друг от друга методов и приборов. Их описание и анализ не входит в наши исследования. Здесь лишь отмечаем роль испарения как элемента водного баланса. Испарение обычно рассчитывается косвенным (расчетным) путем. Существует много расчетных и эмпирических методов определения испарения: А.И. Будаговского [31], М. И. Будыко [28], П.С. Кузина и Б.В. Полякова [106], П.П. Кузьмина [107], А.Р. Константинова [98], В.И. Кузнецова, В.С. Голубева, Т.Г. Федоровой [109] и др. Существуют рекомендации по определению испарения с поверхности суши [138]. Для определения испарения расчетным путем необходимы данные испарительных установок и данные наблюдений метеорологических станций. При отсутствии или недостаточности данных наблюдений за испарением в некоторых случаях могут оказаться полезными региональные карты и атласы средних многолетних значений

испарения. По этим картам, построенным в изолиниях среднее многолетнее значение испарения для любых территорий легко определить путем планиметрирования. Здесь необходимо отметить, что для воднобалансовых целей карты осадков, стока и испарения должны быть увязаны между собой, т.е. разность осадков, испарения и стока, определенных по соответствующим картам изолиний для данного речного бассейна представлена уравнением

$$\bar{P} - \bar{E} - \bar{R} = 0 \quad (1.22)$$

где: $\bar{P}, \bar{R}, \bar{E}$ – среднемноголетние значения атмосферных осадков, которые выпадают на поверхность суши речного бассейна, речного стока и суммарного испарения. В исследовании размерность значений атмосферных осадков, речного стока и испарения применяется мм/год.

Уравнение (1.22) впервые предложено Пенком [170], в дальнейшем было развито П.С. Кузиным [106], Мезенцевым В.С. [118], они, как и другие ученые использовали разность между осадками и речным стоком для определения среднегодового испарения с поверхности суши в речном бассейне.

Как уже отметили, наиболее удобным и достаточно широко распространенным методом для оценки испарения выступает метод водного баланса речного бассейна. Кроме этого, в настоящее время методом расчета испарения с речного водосбора является комплексный метод предложенный М.И. Будыко [27].

Влагозапасы речного водосбора. Результаты анализа воднобалансовых исследований [14, 33, 34, 89, 116, 137] свидетельствуют о том, что влага речного бассейна активно участвует в формировании влагозапасов водосбора. Как видно из (1.8) – (1.9) составляющая правой части $\pm \Delta V$ характеризует не только трансформацию части влагозапасов, которые участвуют в формировании уровня бассейновых влагозапасов (УБВ), но и участвует в формировании испарения воды с поверхности водосбора и речного стока. При этом происходит процесс, при котором происходит сработка бассейновых влагозапасов (в случае $\Delta V > 0$). Это означает, что они участвуют в формировании речного стока и испарения. При этом

УБВ в многолетнем разрезе не отражается на величинах таких элементов водного баланса, как речной сток и испарение. Но в водных балансах отдельных лет роль УБВ соизмерима с остальными элементами. Следовательно, отсутствие данных об изменении бассейновых влагозапасов делает невозможным применение уравнений (1.8) – (1.9) в воднобалансовых исследованиях. Из сказанного видно, насколько важную роль играет определение УБВ.

Общее количество бассейновых влагозапасов складывается из поверхностных и подземных влагозапасов. УБВ в гидрологический год складывается из изменения влагозапасов в озерах, в болотах, в снежном покрове, в гидрологической сети водосбора, включая различные понижения рельефа (поверхностная составляющая), в зоне аэрации и в зоне насыщения (подземная составляющая). Методы определения указанных видов УБВ, особенно УБВ снежного покрова достаточно детально обсуждается в работах П.П. Кузьмина [108].

При понижении температуры создаются условия для перехода атмосферных осадков из жидкого состояния в твердое, и в конечном итоге образуется снежный покров, который является наиболее существенным источником формирования влагозапасов в поверхностной зоне водосбора. Особенности твердых осадков заключаются в том, что они вступают в гидрологический процесс с запаздыванием, длительность которого определяется температурным режимом данного участка речного водосбора и может измеряться месяцами. Запасы воды в снежном покрове увеличиваются на протяжении всей зимы и достигают наибольших значений в феврале-марте, после чего начинается их быстрая сработка с возрастанием температурного режима окружающей среды.

Воднобалансовая роль аккумуляции воды в гидрографической сети, в различных понижениях рельефа, в озерах, в болотах, в зоне аэрации и в зоне насыщения заключается в том, что она участвует в разных гидрологических процессах. В частности, она может пополнить речной сток, расходоваться на испарение и пополнять подземные воды и т.п. При этом наибольшие пополнения бассейновых влагозапасов происходят в период половодья, а сработка – в период

межени. Аккумуляцией в микро - и макропонижениях, включая аккумуляцию русловой сети можно пренебречь, так как их недоучет не увеличивает погрешности определения таких элементов водного баланса как речной сток и испарение.

В структуре уравнений водного баланса значительную роль играет УБВ подземной составляющей. Эти влагозапасы состоят из запасов зоны аэрации и запасов зоны насыщения, различающиеся формами влаги и методами изучения. Воднобалансовая роль влагозапасов зоны аэрации состоит в том, что они являются источником влаги для испарения с водосбора и частично участвуют в наполнении зоны насыщения. Зона аэрации большое значение имеет для развития растительного покрова и является единственным источником его обеспечения естественным водопотреблением. Воднобалансовая роль влагозапасов зоны насыщения состоит в том, что они являются прежде всего источником питания рек. Кроме этой функции влаги, зона насыщения участвует в пополнении зоны аэрации и испарении из подземной зоны и, наконец, участвует в водообменных процессах между зонами насыщения и слоями ниже водоупора. Большой сложностью представляется вычисление средней величины изменения подземных влагозапасов для всего водосбора, особенно для средних и больших речных бассейнов. Рекомендации вычислять его как среднее взвешенное с учетом особенностей гидрогеологического строения водосбора не осуществимы, так как влага, участвующая в формировании подземного стока слабо изучена, а сеть наблюдательных скважин, как правило, недостаточна. Количественное определение УБВ для каждого выше рассмотренного вида объекта с требуемой практикой точностью требует организации детальных, трудноосуществимых и дорогостоящих экспериментальных полевых исследований для получения данных о характере водосбора.

В заключение отметим, что глобальный водообмен требует создания мониторинга водных объектов, который должен иметь связь с мониторингом Федеральной службы по гидрометеорологии и окружающей среды (Росгидромет) и государственным мониторингом состоянии недр. Следует отметить, что в области информационных технологий применяются спутниковые методы при

определении положений и координат земных объектов, включая непосредственно съёмку ситуации и рельефа. Использование спутниковых технологий в мониторинге водных объектов позволяет в значительной степени ускорить производство гидрометрических работ, повысить точность и достоверность получаемой информации о состоянии речных бассейнов, уточнить их гидрографические и морфометрические характеристики. Космические методы позволяют получить информацию для всего земного шара и интегрировать ее во времени и пространстве. В перспективе являются единственной системой наблюдений адекватной поставленным глобальным задачам, и в том числе при изменении климата, который оказывает влияние на ЭВБ речного бассейна. На основе этого происходит прогнозирование притока воды к замыкающим створам в будущем.

1.4. Влияние природных и антропогенных факторов на ЭВБ речного бассейна

Одной из главных проблем современной гидрологической науки является проблема управления водными балансами речных водосборов. Ее решение во многом определяется вариациями ЭВБ в зависимости от параметров окружающей среды и развитием экономики территории, а также прогнозированием притока речных вод в замыкающим створе в зависимости от определяющих его природных и антропогенных факторов и факторов времени.

Анализируя фактические данные временных рядов гидрологических и климатических значений, обнаруживаем циклы колебаний, которые характеризуются повторяемостью, но имеют отличия в параметрах. Это позволяет рассмотреть концепцию, которая включает в себя антропогенно-обусловленное (нестационарное) изменение ЭВБ. Наличие нестационарности свойственной ЭВБ приводит к выявлению в многолетних колебаниях однонаправленных тенденций (трендов). В результате можно получить информацию о детерминированной составляющей временных рядов и установить функциональные связи между

факторами внешнего воздействия и реакцией (отклика) системы. Главным природным фактором изменения ЭВБ является изменение глобального и с ним тесно связанного регионального климата. Изменение климата речных бассейнов происходит, прежде всего, благодаря изменению глобального и регионального климата и антропогенным факторами. Таким образом, изменение климата и ЭВБ взаимосвязаны и определяются многолетней динамикой комплекса характеристик Земли и Солнечной системы. Наглядный цикл изменения ЭВБ можно проследить по их разностным интегральным кривым. В этих кривых наряду с глобальным синусоидальным циклом можно выделить локальные циклы, различающихся меньшими периодами по длине и по амплитуде.

Распределение атмосферных осадков связано с особенностями циркуляции атмосферы. Различаются три вида циркуляции: западная (W), восточная (E) и меридиональная (C), используя классификацию Г.Я. Вангенгейма и А.А. Гирса [73, 74, 80, 81, 82, 83]. Влагозапасы как одна из важнейших характеристик речного водосбора определяет его влагонасыщенность и связаны с направлением и с интенсивностью развития воднобалансовых процессов. В формировании поверхностных влагозапасов принимают участие снежный покров и аккумуляция вод в гидрографической сети, включая озера, болота и в другие различные понижения рельефа. Воднобалансовые значения аккумуляции воды в гидрографической сети заключаются в том, что они участвуют прежде всего в формировании речного стока и испарения. Однако главная их роль заключается в питании влагозапасов подземной зоны. Основными природными факторами определяющими бассейновые влагозапасы являются снежные покровы, которые накапливаются в зимний период, дождевые осадки в период половодья и гидрографические характеристики речной сети с учетом особенностей гидрогеологического строения водосбора.

Начиная с середины XX столетия резко возрос интерес исследователей, как в России, так и за рубежом к изменению климатической и гидрологической системе Земли [8, 21, 29, 30, 40, 49, 61, 95, 96, 164, 150]. Достоверно доказано, что на протяжении геологической истории Земли (4,65 млрд. лет) вместе со всей земной

природой менялся состав атмосферы, ее масса, и соответственно менялся и климат [158]. Естественно, за этот период времени многократно изменились материки, горные системы, площадь суши и океанов, а также светимость Солнца и, наконец, оси вращения Земли и т.п. По мере перехода от древних эпох истории Земли к более поздним количество методов, позволяющих определить климатические изменения Земли, расширяются и становятся более детальными и понятными. Потепление климата, которое происходит с середины XX обусловлено последовательным изменением элементов гидрологического цикла и гидрологических систем [21, 49, 95, 96]. Проведение измерений фактического испарения в глобальном масштабе очень ограничено, поэтому существующие временные ряды непригодны для каких-либо серьезных выводов, тем более для оценки этих составляющих водного баланса в глобальном плане и выявления трендов в связи с происходящими изменениями в климатических и гидрологических системах речных бассейнов и Земли в целом. В то же время существуют предположения, что фактическое испарение возросло во второй половине XX века в засушливых районах России и США, что было обусловлено увеличением количества осадков, а также возросшей потребностью в атмосферной влаге в связи с повышением температуры.

Выявлению изменений в речном стоке в связи с изменением глобального и регионального климата посвящено большое число работ зарубежных климатологов [21, 97]. Они определили возможные тенденции расхода воды в реках на протяжении XX века в масштабах, которые могут быть от водосборного бассейна до всей территории земного шара. По имеющимся данным, в глобальном масштабе можно наблюдать более или менее четкую картину изменений годового стока. В то же время, в некоторых местах он увеличивается (например, на высоких широтах и на больших участках территории России, США), а в других – уменьшается. Исходя из этого, климатологическая система характеризуется доминирующим воздействием на элементы гидрологического цикла и на ЭВБ речного бассейна. Одновременно следует отметить, что изменения ЭВБ во многом зависят также от вида антропогенных факторов. Формы и виды влияния антропогенных факторов на ЭВБ по характеру воздействия на гидрологический процесс и соответственно на

ЭВБ подразделяются на две группы: факторы, оказывающие основное воздействие в русле реки; факторы, оказывающие основное воздействие на условия формирования ЭВБ на поверхности водосбора. Вопросы антропогенного влияния на водный баланс речных бассейнов достаточно подробно изложены в трудах Бабкина В.И. и В.С. Вуглинского [14], А.Г. Булавко [33], К.В. Кондратовича (99), Н.И. Коронкевича и сотрудников его школы [100, 101], М.И. Львовича [112], С.И. Харченко [153, 155], И.А. Шикломанова [161, 162, 171] и др.

Анализ результатов воднобалансовых исследований применительно к данным о влиянии хозяйственной деятельности человека на процесс формирования ЭВБ речного бассейна можно обобщить, используя следующие направления. Применение методов статистического анализа [38, 135, 136, 162]. Понимание изменения ЭВБ в результате воздействия антропогенных факторов может быть получено с помощью воднобалансовых методов [14, 33, 46, 47, 142]. При моделировании с использованием уравнений влаго-солепереноса выполняется физико-математическое моделирование [8, 74, 169].

Наличие гидромелиоративных систем с орошаемым земледелием является одним из факторов, который влияет на трансформирование ЭВБ. Это особенно относится к территории поверхности водосбора, на котором развивается орошаемое земледелие [142].

Уравнение общего водного баланса имеет вид:

$$P + W_{\text{п.ор.}} + W_{\text{м.кн.}} + W_{\text{х.кн.}} + W_{\text{пр.пов.}} + W_{\text{пр.гр.}} + W_{\text{пр.почв.}} - W_{\text{от.пов.}} - W_{\text{от.гр.}} - W_{\text{от.почв.}} - E - E_{\text{кан.}} - E_{\text{дож.}} - W_{\text{сбр.}} = \pm \Delta V + J_{\text{вод.обм}} \pm \eta \quad (1.23)$$

$$\Delta V = \Delta V_{\text{подз.}} + \Delta V_{\text{пов.}}; \Delta V_{\text{подз.}} = \Delta A + \Delta G \quad (1.24)$$

$$\Delta V_{\text{пов.}} = \Delta V_{\text{сн.}} + \Delta V_{\text{пон.}} + \Delta V_{\text{бол.}} + \Delta V_{\text{пр.вдхр.}}$$

где: P – осадки, выпадающие на поверхность мелиорируемых земель; $W_{\text{п.ор.}}$ и $W_{\text{сбр.}}$ – подача и сброс оросительных вод; $W_{\text{м.кн.}}$ и $W_{\text{х.кн.}}$ – потери воды из магистральных и хозяйственных каналов; $W_{\text{пр.пов.}}$, $W_{\text{пр.гр.}}$ и $W_{\text{пр.почв.}}$ – приток

подземных, поверхностных, грунтовых и внутрипочвенных вод; $W_{\text{от.пов.}}$, $W_{\text{от.гр.}}$ и $W_{\text{от.почв.}}$ – отток подземных, поверхностных, грунтовых и внутрипочвенных вод; E – испарение, $E_{\text{кан.}}$ и $E_{\text{дож.}}$ – испарение каналов и при орошении дождеванием; ΔV – изменение бассейновых запасов в расчетном интервале времени, включает в себя поверхностные ($\Delta V_{\text{пов.}}$) и подземные ($\Delta V_{\text{подз.}}$) составляющие; ΔA и ΔG – запасы влаги; $\Delta V_{\text{сн.}}$, $\Delta V_{\text{пон.}}$, $\Delta V_{\text{бол.}}$ и $\Delta V_{\text{пр.вдхр.}}$ – влагозапасы снега, в понижениях, на заболоченных участках, в прудах и водохранилищах; $J_{\text{вод.обм}}$ – водообмен до водоупора; η – ошибка водного баланса. В исследовании значения атмосферных осадков, речного стока, испарения и влагозапасов измеряются в мм/год.

Одним из важных антропогенных факторов, влияющих на изменение ЭВБ, в частности, для формирования речного стока является строительство и функционирование водохранилищ на главных и основных притоках речных систем [4]. В традиционном понимании водохранилища представляют собой искусственно созданные накопители водных ресурсов, перераспределяющие речной сток между сезонами года или в многолетии. Создание водохранилищ является антропогенным вмешательством не только в водную экологию, но и оказывает влияние на климат территории, изменяется приток речных вод в нижних бьефах водохранилищ. На рисунке 1.5 приведена схема Волжско-Камского каскада водохранилищ в бассейне Волги. В бассейне Волги функционируют 11 гидроузлов с водохранилищами, которые осуществляют в основном сезонное регулирование её стока за исключением Рыбинского водохранилища, осуществляющего частично многолетнее регулирование. Бассейн Волги охватывает наиболее населенные и развитые в промышленном отношении области России. На территории областей и республик, примыкающих к стволу Камы и Волги (общая площадь около 950 тысяч км²), проживает более 60 млн. человек.

Для данного бассейна наряду с водным балансом необходимо составлять водохозяйственный баланс, их совместное решение позволит реализовать комплекс водохозяйственных мероприятий для улучшения экологической

ситуации и водообеспечения всех заинтересованных отраслей экономики и населения. Агролесомелиоративные мероприятия, проводимые в районах неустойчивого и недостаточного увлажнения, способствуют задержанию воды на склонах. Распаханность склонов, особенно с большими уклонами способствует увеличению интенсивности стока.



Рисунок 1.5 – Схема Волжско-Камского каскада водохранилищ на реке Волге

Интенсификация сельского хозяйства и повышение урожайности сельскохозяйственных культур приводят к значительному увеличению водопотребления растениями, а следовательно, и к соответствующему снижению общего стока рек. Развитие агролесомелиоративных мероприятий приводит к просачиванию и пополнению запасов влаги в зону аэрации, а затем расходуются на продуктивное испарение, вследствие чего заметно снижается суммарный речной сток. При трансформации речного стока при развитии орошения, наряду с объемом водопотребления, большое значение имеет величина возвратных вод [68, 70]. Влияние осушения на водный режим и водный баланс проявляется

непосредственно на мелиорируемых территориях, на землях, прилегающих к осушительным системам, и в целом на речных водосборах. Осушительные мероприятия резко изменяют уровень грунтовых вод и увлажненность почвогрунтов, режим испарения и транспирацию с болотных ландшафтов. Влияние промышленности и населения на трансформацию ЭВБ речных бассейнов многообразно. Водные ресурсы, используемые промышленностью и коммунальным хозяйством, возвращаются обратно в виде сточных вод, характеризующихся резким изменением химического состава. На гидрологический цикл большое влияние оказывает урбанизация, которая изменяет природные ландшафты и оказывает влияние на все элементы водного баланса, гидрологический режим и окружающую среду. Влияние урбанизации на гидрологический цикл – это сложная самостоятельная проблема, которая требует своего решения.

Выводы по первой главе

1. В ходе анализа современного состояния воднобалансовых исследований становится ясно, что они находятся на стадии развития. Решение задач определения ЭВБ, особенно суммарного испарения и изменения бассейновых влагозапасов и их участие в формировании речного стока и испарения являются одной из сложных проблем. Основной из них является техника измерения суммарного испарения и бассейновых влагозапасов, а также распространение полученных результатов на весь бассейн или какую-то его часть. Однако она в большей степени недостаточно точна и надежна для определения основных составляющих водного баланса. Распределение суммарного испарения и бассейновых влагозапасов и запасов влаги в ней зависит от неоднородности рельефа и почвы, радиационного баланса территории, уклона местности, микрорельефа (наличие возвышенностей и понижений, озерность, заболоченность и лесистость) и других факторов. Даже при достаточно густой сети пунктов наблюдений нет возможности учесть весь мозаичный характер строения рельефа

водосборной территории речного бассейна и его водного режима. Кроме того, проблема возникает при расчете водного баланса отдельных лет, сезонов и месяцев. Сложность возникает при определении трансформации бассейновых влагозапасов (сработка и наполнение), принимающих участие в формировании речного стока и общего испарения с территории водосбора. В связи с этим, наиболее надежными являются методы исследования, позволяющие интегрально оценить суммарное испарение и бассейновые влагозапасы, учитывая их взаимные связи с природными и антропогенными параметрами.

2. Оценка процессов, которые развиваются в зоне аэрации почво-грунтов и в пограничном слое атмосферы, особенно оценка процессов влагообмена на мелиорируемых и прилегающих к ним территориях является сложной. Достаточно хорошо развиты те направления, которые опираются на эмпирические и полуэмпирические методы, которые основаны на выявленных закономерностях тепло и влагообмена на поверхности речного бассейна. Исходными данными для изучения процессов, возникающих в слоях влагообмена почво-грунтов и подстилающем приземном слое территории речного водосбора, являются гидрометеорологические, аэрологические и агрометеорологические данные за длительный период наблюдений как на стандартной опорной сети станций, так и на специализированных воднобалансовых и гидромелиоративных станциях.

3. Рассмотренные вышеуказанные позиции открывают новые подходы: 1) к разработке методологии учета трудноизмеримых составляющих водного баланса, таких как, суммарное испарение с поверхности суши и изменение бассейновых влагозапасов; 2) к установлению значений уравнений с целью определения отклика притока в замыкающем створе реки в изменяющихся условиях глобального климата и как следствие регионального климата; 3) к разработке методики прогноза притока речных вод к основным замыкающим створам речных систем и её реализации применительно к речному бассейну реки Волги.

Данная диссертационная работа посвящена исследованиям именно этих задач.

ГЛАВА 2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭВБ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКИ

2.1. Совершенствование методики определения трудноизмеряемых элементов водного баланса, таких как суммарное испарение с территории речного бассейна и изменение бассейновых влагозапасов

Общая постановка. Анализ современного состояния ЭВБ (глава 1) показал, что относительно простой вид наиболее распространенного четырехчленного уравнения водного баланса речного бассейна, которое включает в себя такие составляющие как атмосферные осадки (P), речной сток (R), суммарное испарение (E), так и изменение бассейновых влагозапасов ($\pm\Delta V$), при расчете многолетнего периода может показаться несложным. Однако на практике перед нами возникает сложная задача, обусловленная трудностью точной оценки суммарного испарения и бассейновых влагозапасов за год и в сезонном разрезе, особенно для средних и крупных водосборов. Усложняет ситуацию и тот факт, что в случаях, когда $\Delta V < 0$ бассейновые влагозапасы, как и атмосферные осадки, играют роль в формировании речного стока и суммарного испарения.

Множество взаимосвязей различных факторов, включая антропогенные определяют многообразие реакций на развитие гидрологических процессов. Для того, чтобы выявить причину межгодовой и сезонной трансформации ЭВБ, необходимо провести сравнительный ретроспективный анализ основных ЭВБ и на основе этого сделать выводы об их взаимосвязи. Это позволяет сделать прогноз притока вод в замыкающем створе речного бассейна. Чтобы осуществить сравнительный ретроспективный анализ ЭВБ, необходимо, имеющиеся короткие наблюдаемые ряды привести к многолетним периодам, т. е. нужны длительные временные ряды наблюдений за атмосферными осадками, речным стоком, суммарным испарением с поверхности суши, изменением бассейновых

влажностных запасов и температурой подстилающей поверхности. Данные длительных рядов атмосферных осадков и речного стока имеются, но, чтобы осуществить сравнительный ретроспективный анализ ЭВБ для конкретного речного бассейна, необходимо получить длительные временные ряды по испарению и бассейновым влажным запасам, что позволит выявить межгодовые и сезонные изменчивости речного стока и установить связь между ЭВБ и климатическими факторами.

Наиболее точно измеряемым ЭВБ речного бассейна, независимо от его размеров, является речной сток. Вторым элементом ЭВБ речного бассейна, который определяется инструментальными наблюдениями, являются атмосферные осадки, определяющие уровень и характер увлажненности речного бассейна.

Имеются существенные проблемы, которые связаны с определением общего количества испарения, а именно с отсутствием достаточно точных способов измерения испарения. Сеть испарителей включает в себя водобалансовые и агрометеорологические станции локального действия, которые не могут обеспечить измерение испарения со всего спектра испаряющих поверхностей, особенно для больших речных бассейнов.

В работе формулируется и решается задача определения суммарного испарения и бассейновых влажных запасов при заданных значениях атмосферных осадков и речного стока, опирающихся на стандартную информацию, полученную на государственных и ведомственных опорных пунктах наблюдений. Предлагаемые методы анализа водного баланса речного бассейна базируются на теоретических положениях, разработанных в лаборатории моделирования поверхностных вод Института водных проблем РАН (г. Москвы) [73].

Математическая постановка задачи: способ оценки элементов водного баланса в части совершенствования определения суммарного испарения и бассейновых влажных запасов заключается в том, что наиболее распространенным подходом к определению суммарного испарения с использованием лишь данных по стоку и осадкам является его оценка по разности суммарных атмосферных осадков и речного стока [75, 84, 86, 87]. Данный подход активно применяется для оценки среднемноголетних значений годового суммарного испарения при условии,

что изменения в запасах влаги бассейна для средних и крупных речных систем за длительный период времени стремиться к нулю. Так как изменение бассейновых влагозапасов в конкретные годы и в целом за год, а тем более за сезон, месяц, декаду или сутки, априори отлично от нуля, то у этого подхода будут значительные погрешности. В данном разделе рассматриваются два математических подхода для оценки суммарного испарения и изменения бассейновых влагозапасов.

Первый подход. Исходя из традиционного уравнения водного баланса речного бассейна получаем выражение:

$$P_i + \Delta V_i = R_i + E_i \quad (2.1)$$

где: P_i , ΔV_i , R_i , E_i – соответственно годовые осадки, изменение бассейновых влагозапасов, сток и испарение. Тогда

$$P_i - R_i = E_i - \Delta V_i \quad (2.2)$$

Таким образом разность осадков и сток дает величину испарения, «преуменьшенную» в случае сработки бассейновых влагозапасов ($+\Delta V_i$) и «преувеличенную» при накоплении ($-\Delta V_i$). Если рассматривать речной сток в качестве результирующего водного баланса бассейна, то разность $P_i - R_i$ можно рассматривать как затраты осадков в пределах речного бассейна. Задача состоит в том, чтобы раскрыть уравнение (2.1) 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.

Из уравнения (2.1) видно, что при $\Delta V_i = 0$

$$P_i = R_i + E_i \quad (2.3)$$

Допустим, что $E_i = 0$, т.е. осадки формируют сток и влагозапасы бассейна:

$$P_i + \Delta V_i = R_i \quad (2.4)$$

И при $\Delta V_i = 0$, $P_i = R_i$. По известным P_i и R_i можно определить ΔV_{iR} – изменение бассейновых влагозапасов, участвующих в формировании стока года (влагозапасов по стоку), при этом необходимо учитывать зависимость $R_{i0} = f(P_i)$, отвечающую условию $\Delta V_i = 0$

$$\Delta V_{iR} = \pm(R_i - R_{i0}) \quad (2.5)$$

где: знак плюс соответствует сработке бассейновых влагозапасов, а минус – их накоплению.

Аналогично, приняв $R_i = 0$, определяем функцию изменения влагозапасов по испарению:

$$\Delta V_{iE} = \pm(E_i - E_{i0}) \quad (2.6)$$

где: $E_{i0} = f(P_i)$ при $\Delta V_i = 0$, а ΔV_{iE} – изменение влагозапасов, участвующих в формировании испарения i -го года.

Таким образом, при одновременном протекании в бассейне процессов стока и испарения, уравнение водного баланса (2.1) примет следующий вид:

$$P_i + \Delta V_{iR} + \Delta V_{iE} = R_i + E_i \quad (2.7)$$

$$\Delta V_i = \Delta V_{iR} + \Delta V_{iE} \quad (2.8)$$

Как видно из уравнения (2.8) бассейновые влагозапасы разделяются по их участию в формировании стока и испарения, также из уравнение (2.8) следует, что

$$\Delta V_i = \begin{cases} 0, \text{ при } \Delta V_{iR} = \Delta V_{iE} = 0 \\ 0, \text{ при } \pm \Delta V_{iR} = \mp \Delta V_{iE} \\ \Delta V_{iR} + \Delta V_{iE} \end{cases} \quad (2.9)$$

Принимая во внимание уравнения (2.5) и (2.6) для определения ΔV_{iR} и ΔV_{iE} по известным P_i, R_i, E_i необходимо установить зависимости

$$R_{i0} = f(P_i), \quad E_{i0} = f(P_i) \quad (2.10)$$

отвечающие равновесному состоянию бассейновых влагозапасов, т.е. при $\Delta V_i = 0$.

В качестве таких зависимостей рассматривались одно- и многофакторные

уравнения регрессии $R_{i0} = f(P_i)$, $E_{i0} = f(P_i)$, $R_{i0} = k_{Rcp} P_i$ и $E_{i0} = (1 - k_{Rcp}) P_i$, где k_{Rcp} – среднемноголетний коэффициент годового стока, связь равнообеспеченных значений стока и осадков [2].

Учитывая тот факт, что в реальных условиях равновесное состояние влагозапасов в бассейне неустойчиво, вряд ли возможно напрямую определить такого рода зависимости, поскольку равновесное состояние одних элементов водного баланса может нарушить равновесие других, и наоборот. Учитывая это, была принята гипотеза о существовании лишь одного «глобального» состояния равновесия гидрологической системы речного бассейна, при котором осадки участвуют в равной степени в формировании стока и испарения. Соответственно, этому принимается:

$$\left. \begin{array}{l} R_i = E_i \\ k_{iR} = k_{iE} = 0,50 \end{array} \right\} \quad (2.11)$$

тогда

$$\left. \begin{array}{l} [\Delta V_{iR}] = R_i - [R_i], \\ [\Delta V_{iE}] = E_i - [E_i] \end{array} \right\} \quad (2.12)$$

где:

$$\left. \begin{array}{l} [R_i] = [E_i] = 0,50 P_i \\ [\Delta V_i] = [\Delta V_{iR}] + [\Delta V_{iE}] \end{array} \right\} \quad (2.13)$$

При преобладании стока над испарением ($k_R > 0,5$) «испаряется» то, что не успел «стечь», а при ($k_R < 0,5$) – «стекает» то, что не успело «испариться». При известных $P_i, R_i, E_i, \Delta V_i$ определение $[\Delta V_{iR}]$ и $[\Delta V_{iE}]$ не составляет труда. В случае когда известны только P_i и R_i возможно определить только $[R_i]$, а затем $[\Delta V_{iR}]$. Для оценки $[\Delta V_{iE}]$ устанавливаются эмпирические зависимости, связывающие данную характеристику с определяющими ее метеорологическими факторами (температура, дефицит влажности воздуха, скорость ветра и др.). Однако, учитывая, что известны только P_i, R_i и $[\Delta V_{iR}]$ можно использовать только эти

факторы. Таким образом, для установления зависимости $[\Delta V_{iE}] = f\{P_i, R_i, [\Delta V_{iR}]\}$ предлагается следующий подход. Для речного бассейна по которому имеются данные обо всех ЭВБ за многолетний период, такие как $P_i, R_i, E_i, \Delta V_i$, в соответствии с уравнениями (2.11) – (2.13) определяются ежегодные значения $[\Delta V_{iR}]$, $[\Delta V_{iE}]$ и их статистические параметры (среднее и стандарт), а также коэффициент взаимной корреляции. Соответственно смыслу методики формируется уравнение регрессии:

$$[\Delta V_{iE}] = a\Delta[\Delta V_{iR}] + b\Delta P_i + [\Delta V_{iE}]_{\text{ср}} \quad (2.14)$$

где: $\Delta[\Delta V_{iR}] = [\Delta V_{iR}] - [\Delta V_{iR}]_{\text{ср}}$, $\Delta P_i = P_i - P_{\text{ср}}$, $[\Delta V_{iE}]_{\text{ср}} = -[\Delta V_{iR}]_{\text{ср}}$, при $[\Delta V_i]_{\text{ср}} = 0$,

а $[\Delta V_{iR}]_{\text{ср}} = R_{\text{ср}} - 0.5P_{\text{ср}}$

Используя уравнение (2.14) определяем окончательный вид $[\Delta V_{iE}]$, а затем определяем ежегодное испарение:

$$[E_i] = 0,5 \cdot P_i + [\Delta V_{iE}] \quad (2.15)$$

Далее для $[E_i]$ определяем выборочные оценки основных статистических параметров (среднее, стандарт, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии и коэффициент автокорреляции). Полученные статистические параметры для расчетного $[E_i]$ сопоставляются с аналогичными параметрами для наблюдаемого (фактического) E_i . Далее осуществляется степень согласия расчетных и фактических значений испарения, для чего используется классический критерий степени согласия (η) корреляционное отношение, имеющее вид:

$$\eta_{\text{расч/набл}}^2 = 1 - \frac{\varepsilon_{\text{ост}}^2}{\sigma_E^2} = R_{\text{расч/набл}}^2 \quad (2.16)$$

где: $\varepsilon_{\text{ост}}^2$ – отклонение расчетного испарения от наблюдаемого, σ_E^2 – среднеквадратическое отклонение наблюдаемого испарения, т.е. равно коэффициенту детерминации R^2 . Таким образом, получаем окончательный вид уравнения (2.14), по которому определяется $[\Delta V_{iE}]$.

В результате реализации описанной методики для ряда бассейнов в зоне действия водно-балансовых станций, по которым располагаем данными об ЭВБ за

многолетний период, получены статистические характеристики для определения коэффициентов регрессии $r([\Delta V_E], P)$, $r([\Delta V_E], R)$, $r([\Delta V_E], [\Delta V_R])$, $\sigma([\Delta V_E])$, $\sigma([\Delta V_R])$, $\sigma(R)$, $\sigma(P)$, которые должны быть известны для определения параметров уравнений вида (2.14). Затем осуществляется поиск эмпирических зависимостей, связывающих их с известными факторами, например, со среднемноголетним коэффициентом годового стока. Такие зависимости используются затем при определении $[\Delta V_{iE}]$, $[E_i]$ и $[\Delta V_i]$ в случае наличия данных лишь по годовым осадкам и стоку за многолетний период для рассматриваемого бассейна.

Предложенный первый подход предполагает участие всех осадков текущего года в формировании стока, испарения и бассейновых влагозапасов этого года. Проводимые исследования показали, что помимо осадков текущего года в формировании стока речных бассейнов также участвуют осадки за предыдущие годы [104, 105, 129, 132, 135, 141, 144]. По этой причине, предлагаемый способ оценки ежегодных значений испарения и влагозапасов должен учитывать этот факт. В работе предлагается второй подход, опирающийся на модель годового стока, предложенную в работах [104, 105, 132, 135, 141].

Второй подход. Предлагается подход, который заключается в использовании простой модели, которая не только не противоречит (в статистическом смысле) данным наблюдений, но и может обеспечить решение прикладной задачи [25]. Начиная с работы С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля [104, 105] последовательности годовых значений речного стока принято рассматривать как реализации марковского процесса. Марковская модель может быть принята в качестве практически приемлемого приближенного описания многолетнего колебания речного стока. В основе второго подхода используется модель простой цепи Маркова.

Принимая во внимание стохастическую зависимость ЭВБ, развитие методики связано с корреляционным уравнением речного стока на основе Марковского процесса [104, 105]:

$$R_i = R_{i,\text{cp.}} + r(1) \frac{\sigma_i}{\sigma_{i-1}} (R_{i-1} - R_{i-1,\text{cp.}}) \quad (2.17)$$

Для выборок достаточной длины ($n \gg 30$) можно принять $R_{i,\text{cp.}} = R_{i-1,\text{cp.}}$ и $\sigma_i = \sigma_{i-1}$, тогда уравнение (2.17) примет вид:

$$[R_i] = r(1)R_{i-1} + R_{i,\text{cp.}}(1 - r(1)) \quad (2.18)$$

Первую из составляющих правой части (2.18) можно трактовать как динамичную или детерминированную составляющую стока текущего года, которая формируется за счет аккумуляции осадков предыдущего года и их сработки в следующем году. Совмещением генетического и динамико-стохастического подходов получены уравнения и зависимости, связывающие влагозапасы с осадками и стоком:

$$P_{\text{AK},i} = r(1)R_i \quad (2.19)$$

$$P_{\text{CРАБ},i} = P_{\text{AK},i-1} = r(1)R_{i-1} \quad (2.20)$$

$$\Delta V_i^{(1)} = P_{\text{CРАБ},i} - P_{\text{AK},i} = r(1)(R_{i-1} - R_i) \quad (2.21)$$

Исходя из формулы (2.20) объем воды i -го года, можно разделить на две составляющие. Первая – сработка трансформированных осадков прошлого года $P_{\text{CРАБ},i}$, а вторая – текущего года за вычетом трансформации:

$$R_i = P_{\text{CРАБ},i} + R_T = r(1)R_{i-1} + R_T \quad (2.22)$$

$$R_T = R_i - r(1)R_{i-1} \quad (2.23)$$

$$P_T = P_i - P_{\text{AK},i} = P_i - r(1)R_i \quad (2.24)$$

Изменение бассейновых влагозапасов тоже имеет две составляющие:

$$\Delta V_i = \Delta V_i^{(1)} + \Delta V_i^{(2)} = r(1)(R_{i-1} - R_i) + [\Delta V_{iR,T}] + [\Delta V_{iE,T}] \quad (2.25)$$

Можно провести оценку $[\Delta V_{iR,T}]$ и $[E_{i,T}]$, применяя эмпирические зависимости, которые были применены в первом подходе. Исходя из этого, в качестве источников информации использовались «данные по водному балансу для водосборов Валдайской станции ГГИ» [101, 102], для «ряда пунктов междуречья реки Волги и Оби» [118, 137] и «реки Хиджи (Япония)» [169], а также данные,

опубликованные в «научно-прикладном справочнике под редакцией М.Л. Маркова» [125]. Для этих водосборов данные были определены с учетом предлагаемого подхода, в том числе годовые значения трансформации влагозапасов по стоку и испарению, статистические характеристики временных рядов ЭВБ и коэффициенты взаимной корреляции с коэффициентами корреляции изменения влагозапасов по испарению с осадками, стоком и изменением влагозапасов. Для наиболее точной и подходящей оценки изменения влагозапасов по испарению рассмотрим уравнение:

$$[\Delta V_{iE}] = a_1 \Delta[\Delta V_{iR}] + a_2 \Delta P_i - [\Delta V_{iR}]_{cp} \quad (2.26)$$

Получаем уравнения, применяя данные по ЭВБ, которые были собраны на воднобалансовых станциях и метеостанции г. Оренбурга, и осуществив параметризацию:

$$[\Delta V_{iE}] = -0,334 \Delta[\Delta V_{iR}] - 0,222 \Delta P_i + 86 \quad (2.27)$$

$$[\Delta V_{iE}] = -0,044 \Delta[\Delta V_{iR}] - 0,419 \Delta P_i - 351 \quad (2.28)$$

$$[\Delta V_{iE}] = -0,475 \Delta[\Delta V_{iR}] - 0,035 \Delta P_i + 143 \quad (2.29)$$

По уравнениями (2.27) – (2.29) определены значения годового изменения влагозапасов по испарению, а вслед за тем получены ряды годового испарения, для которых была проведена оценка их статистических характеристик и проведено сравнение с показателями исходных рядов годовых испарений.

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 2.1 приведены сравнительные характеристики временных рядов расчетного $[E_i]$ и фактического E_i испарения, которые показывают достаточно высокий уровень совпадения. Результаты расчетов (2.16) показали, что полученные значения критерия η были достаточно высокими ($\eta \geq 0,83$).

Таблица 2.1 – Сравнительные характеристики 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 2.1 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).

2.2. Результаты расчета годового и сезонного суммарного испарения и изменения бассейновых влагозапасов

Разработан алгоритм расчета, позволяющий определить трудноизмеряемые составляющие водного баланса, такие как годовые и сезонные (половодье и межень) значения суммарного испарения с поверхности суши речного бассейна и бассейновых влагозапасов. Весь расчет табулирован. Учитывая ограниченный объем диссертации алгоритм расчета не приводится. В таблицах приводятся результаты расчета элементов водного баланса бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда для периодов 1891/1892 – 2020/2021 гг. (n= 130 лет) и 1914/1915 – 2020/2021 гг. (n=107 лет). В таблицах 2.2 и 2.3 изложены результаты расчета элементов водного баланса, таких как атмосферные осадки, речной сток, суммарное испарение и изменение бассейновых влагозапасов в зоне формирования у Волгограда, полученные по предложенной методике и алгоритму расчета.

В таблицах 2.2 и 2.3 приведены статистические параметры суммарного испарения, которые составили – среднемноголетняя величина для рассматриваемых периодов: 1914/1915 – 2020/2021 гг. (n=107 лет) и 1891/1892 – 2020/2021 гг. (n=130 лет) – соответственно 469 мм/год и 476 мм/год; среднеквадратическое отклонение – соответственно 49 мм/год и 46 мм/год; коэффициент вариации (C_v) – соответственно 0,10 и 0,10.

Для подтверждения достоверности полученных результатов проведено сопоставление с оценкой статистических характеристик многолетнего колебания испарения реки Волги до Волгограда в работе А.В. Фролова [151], в которой приведены следующие показатели: среднемноголетняя величина испарения – 460 мм/год, коэффициент вариации – 0,13. Как видно отклонение по среднемноголетнему значению испарения находится в пределах 2-3 %, аналогичные отклонения имеются и при сравнении других статистических параметров. Таким образом, проведенные сопоставления позволяют прийти к выводу, что определение трудноизмеряемого элемента, такого как суммарное испарение достоверно.

Таблица 2.2 – Ряды годовых значений элементов водного баланса бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда за период 1891/1892–2020/2021 гг. (n=130 лет).

n	Годы	РГ (XI-X)	РГ (IV-III)	ЕГ	$\Delta VГ$
1	1891/1892	670	131	579	39
2	1892/1893	617	185	450	18
3	1893/1894	634	200	436	2
4	1894/1895	780	207	527	-47
5	1895/1896	675	217	436	-22
6	1896/1897	615	158	494	37
7	1897/1898	566	150	473	57
8	1898/1899	553	138	484	69
9	1899/1900	757	241	452	-64
10	1900/1901	680	194	478	-8
11	1901/1902	541	167	427	53
12	1902/1903	804	202	551	-51
13	1903/1904	632	192	448	8
14	1904/1905	603	163	478	38
15	1905/1906	785	197	547	-41
16	1906/1907	644	167	499	22
17	1907/1908	638	151	521	35
18	1908/1909	724	203	494	-27
19	1909/1910	630	193	446	8
20	1910/1911	697	132	596	31
21	1911/1912	623	166	486	29
22	1912/1913	684	186	495	-3
23	1913/1914	772	189	551	-32
24	1914/1915	745	215	487	-42
25	1915/1916	727	215	476	-36
26	1916/1917	804	242	484	-78
27	1917/1918	574	207	382	15
28	1918/1919	747	199	517	-31
29	1919/1920	660	191	469	0
30	1920/1921	525	149	446	70
31	1921/1922	541	120	507	86
32	1922/1923	724	185	524	-15
33	1923/1924	702	218	452	-31
34	1924/1925	630	180	467	17
35	1925/1926	808	188	578	-42
36	1926/1927	785	283	400	-101
37	1927/1928	755	247	441	-67
38	1928/1929	733	237	443	-53
39	1929/1930	643	209	427	-7
40	1930/1931	668	172	507	11
41	1931/1932	663	174	500	11
42	1932/1933	621	198	431	7
43	1933/1934	611	157	492	39
44	1934/1935	622	146	520	44

Продолжение таблицы 2.2

n	Годы	РГ (XI-X)	РГ (IV-III)	ЕГ	ΔVГ
45	1935/1936	721	162	562	3
46	1936/1937	511	133	464	86
47	1937/1938	585	117	543	75
48	1938/1939	558	126	508	76
49	1939/1940	570	133	505	68
50	1940/1941	559	143	480	64
51	1941/1942	756	188	541	-27
52	1942/1943	650	202	443	-4
53	1943/1944	625	174	475	23
54	1944/1945	645	170	495	20
55	1945/1946	689	171	524	6
56	1946/1947	659	210	436	-13
57	1947/1948	671	245	386	-40
58	1948/1949	691	209	461	-21
59	1949/1950	575	158	466	49
60	1950/1951	656	185	476	6
61	1951/1952	546	166	432	52
62	1952/1953	707	181	519	-7
63	1953/1954	722	193	510	-19
64	1954/1955	649	145	540	36
65	1955/1956	662	199	458	-5
66	1956/1957	757	198	526	-33
67	1957/1958	710	232	435	-43
68	1958/1959	709	218	458	-33
69	1959/1960	675	184	492	1
70	1960/1961	601	173	459	31
71	1961/1962	636	182	467	14
72	1962/1963	755	200	521	-34
73	1963/1964	587	176	443	33
74	1964/1965	602	167	470	35
75	1965/1966	664	201	454	-8
76	1966/1967	684	218	441	-25
77	1967/1968	522	138	463	79
78	1968/1969	677	188	487	-2
79	1969/1970	585	183	430	29
80	1970/1971	646	210	427	-9
81	1971/1972	621	201	424	5
82	1972/1973	510	160	418	68
83	1973/1974	765	157	601	-7
84	1974/1975	576	204	388	16
85	1975/1976	481	125	456	100
86	1976/1977	664	155	533	24
87	1977/1978	720	174	541	-5
88	1978/1979	819	238	500	-80
89	1979/1980	645	247	364	-34
90	1980/1981	741	213	490	-39

Окончание таблицы 2.2

n	Годы	РГ (XI-X)	РГ (IV-III)	ЕГ	$\Delta VГ$
91	1981/1982	611	221	385	-5
92	1982/1983	665	202	454	-9
93	1983/1984	774	210	516	-47
94	1984/1985	641	173	487	19
95	1985/1986	769	218	500	-51
96	1986/1987	687	226	429	-32
97	1987/1988	714	199	493	-22
98	1988/1989	637	175	481	19
99	1989/1990	754	179	555	-20
100	1990/1991	916	269	516	-131
101	1991/1992	632	241	365	-26
102	1992/1993	656	192	465	1
103	1993/1994	764	222	489	-53
104	1994/1995	691	257	378	-55
105	1995/1996	632	196	441	5
106	1996/1997	471	148	410	87
107	1997/1998	725	187	521	-17
108	1998/1999	714	218	461	-35
109	1999/2000	662	196	462	-4
110	2000/2001	692	191	492	-9
111	2001/2002	700	221	447	-32
112	2002/2003	658	189	471	2
113	2003/2004	647	199	447	-1
114	2004/2005	680	202	464	-13
115	2005/2006	618	200	426	7
116	2006/2007	647	197	450	0
117	2007/2008	721	192	510	-19
118	2008/2009	668	194	470	-4
119	2009/2010	593	167	463	37
120	2010/2011	491	155	412	76
121	2011/2012	702	161	550	9
122	2012/2013	735	208	493	-34
123	2013/2014	720	218	466	-37
124	2014/2015	599	153	492	45
125	2015/2016	658	182	483	7
126	2016/2017	705	190	503	-12
127	2017/2018	752	233	462	-57
128	2018/2019	630	186	456	13
129	2019/2020	679	217	438	-24
130	2020/2021	684	180	505	1
среднее		665	189	476	0
срkwоткл		77	32	46	
Cv		0,12	0,17	0,10	
r[1]		0,06	0,40	-0,09	

Примечание: РГ – суммарные годовые осадки; РГ – сток годового периода; ЕГ – годовое суммарное испарение; $\pm\Delta VГ$ – изменение бассейновых влагозапасов за год, мм/год

Таблица 2.3 – Ряды годовых и сезонных значений элементов водного баланса бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда за период 1914/1915 – 2020/2021 гг. (n=107 лет), мм.

n	Годы	PВ	RB (IV-VI)	ЕВ	$\Delta VВ$	PM	RM	EM	ΔVM	РГ	RG	EG	ΔVG
1	1914/1915	407	150	94	-163	509	61	425	-23	753	211	519	-23
2	1915/1916	374	139	98	-136	477	76	376	-26	715	215	474	-26
3	1916/1917	388	140	100	-148	564	101	357	-106	805	241	458	-106
4	1917/1918	296	143	81	-71	352	57	359	64	576	201	440	64
5	1918/1919	375	109	127	-138	527	83	381	-62	763	192	509	-62
6	1919/1920	321	125	102	-93	428	62	383	17	656	188	485	17
7	1920/1921	311	112	113	-86	303	40	376	113	528	152	489	113
8	1921/1922	241	71	139	-30	324	40	385	101	535	112	524	101
9	1922/1923	398	124	117	-157	493	59	423	-12	734	183	540	-12
10	1923/1924	325	138	91	-96	493	79	375	-39	722	218	466	-39
11	1924/1925	314	111	114	-88	407	66	365	24	633	177	480	24
12	1925/1926	389	108	131	-150	561	76	415	-71	800	184	546	-71
13	1926/1927	385	182	60	-143	624	104	380	-140	866	286	440	-140
14	1927/1928	340	153	80	-108	516	95	349	-73	749	248	429	-73
15	1928/1929	337	137	94	-106	506	96	342	-68	737	233	436	-68
16	1929/1930	341	151	81	-108	418	65	372	19	651	216	454	19
17	1930/1931	287	88	131	-67	452	79	357	-17	672	167	488	-17
18	1931/1932	289	112	109	-68	450	58	404	12	671	170	513	12
19	1932/1933	324	145	84	-95	385	56	379	50	614	201	463	50
20	1933/1934	307	88	135	-83	370	57	367	55	593	146	502	55
21	1934/1935	316	91	134	-92	392	52	390	50	617	143	524	50
22	1935/1936	319	79	146	-94	501	78	381	-41	725	157	527	-41
23	1936/1937	218	90	118	-10	293	47	354	109	501	137	472	109
24	1937/1938	300	70	151	-79	365	42	400	78	585	112	551	78
25	1938/1939	339	88	141	-110	338	37	400	99	567	125	541	99
26	1939/1940	303	92	130	-80	351	39	401	89	574	132	531	89
27	1940/1941	280	101	118	-61	339	40	393	94	558	141	511	94
28	1941/1942	420	139	107	-174	526	52	455	-19	771	191	561	-19

Продолжение таблицы 2.3

n	Годы	PB	RB (IV-VI)	EB	ΔVB	PM	RM	EM	ΔVM	PG	RG	EG	$\Delta VG = \Delta VB$
29	1942/1943	326	129	99	-97	436	68	373	5	665	198	472	5
30	1943/1944	320	112	115	-93	419	65	373	19	645	177	488	19
31	1944/1945	395	113	127	-155	425	52	406	33	665	165	533	33
32	1945/1946	307	93	130	-83	464	64	395	-4	687	158	525	-4
33	1946/1947	273	143	77	-53	451	66	386	1	671	209	463	1
34	1947/1948	347	177	58	-112	437	67	378	7	672	244	436	7
35	1948/1949	309	134	92	-83	476	66	397	-13	702	201	488	-13
36	1949/1950	298	105	118	-75	362	48	385	71	584	153	503	71
37	1950/1951	281	92	126	-62	456	86	341	-29	675	179	467	-29
38	1951/1952	296	113	109	-73	318	41	380	104	540	155	489	104
39	1952/1953	311	94	130	-87	486	83	362	-41	710	177	492	-41
40	1953/1954	331	117	112	-102	506	74	393	-39	735	191	505	-39
41	1954/1955	277	80	137	-59	460	68	385	-7	677	148	522	-7
42	1955/1956	398	152	91	-156	425	50	410	35	668	202	501	35
43	1956/1957	314	110	115	-88	543	76	406	-60	768	186	522	-60
44	1957/1958	385	161	80	-144	479	71	387	-21	720	232	467	-21
45	1958/1959	399	147	95	-157	462	65	394	-4	705	212	489	-4
46	1959/1960	360	115	119	-126	446	58	401	14	680	173	520	14
47	1960/1961	293	107	114	-71	365	61	357	53	587	168	471	53
48	1961/1962	352	120	112	-119	413	60	382	29	646	180	495	29
49	1962/1963	381	107	130	-144	520	84	377	-59	757	191	507	-59
50	1963/1964	283	116	104	-63	376	60	363	47	597	177	467	47
51	1964/1965	294	110	112	-72	382	56	377	50	604	166	489	50
52	1965/1966	356	121	112	-122	450	77	360	-13	683	198	472	-13
53	1966/1967	369	159	79	-131	450	53	415	18	688	212	494	18
54	1967/1968	238	85	126	-27	318	52	356	90	529	137	482	90
55	1968/1969	357	120	113	-123	467	62	403	-2	701	182	517	-2
56	1969/1970	265	105	112	-48	376	77	325	26	593	182	437	26
57	1970/1971	336	148	83	-104	420	59	389	27	652	207	472	27
58	1971/1972	272	111	107	-54	411	78	339	6	629	189	446	6
59	1972/1973	256	107	108	-41	303	47	359	103	518	155	467	103

Продолжение таблицы 2.3

n	Годы	PB	RB (IV-VI)	EB	ΔVB	PM	RM	EM	ΔVM	PG	RG	EG	$\Delta VT = \Delta VB$
60	1973/1974	290	82	138	-70	545	66	429	-49	765	148	567	-49
61	1974/1975	330	144	86	-100	345	61	348	63	575	205	434	63
62	1975/1976	246	72	140	-34	270	42	357	128	481	113	497	128
63	1976/1977	355	98	134	-123	428	57	396	25	660	155	530	25
64	1977/1978	331	100	128	-103	500	70	400	-30	728	170	528	-30
65	1978/1979	387	123	116	-148	570	119	320	-132	809	242	436	-132
66	1979/1980	300	171	56	-74	409	81	331	3	635	252	387	3
67	1980/1981	338	118	113	-108	518	104	330	-85	749	221	443	-85
68	1981/1982	310	144	82	-83	396	71	348	23	622	215	430	23
69	1982/1983	354	116	117	-121	433	87	328	-17	666	203	445	-17
70	1983/1984	390	108	131	-151	533	100	345	-88	772	208	476	-88
71	1984/1985	247	82	131	-35	436	96	308	-32	649	178	439	-32
72	1985/1986	391	137	104	-150	527	87	372	-67	767	224	476	-67
73	1986/1987	318	127	100	-91	463	104	302	-56	690	232	402	-56
74	1987/1988	321	115	112	-94	488	85	358	-44	715	200	470	-44
75	1988/1989	313	108	118	-88	409	64	370	25	635	172	488	25
76	1989/1990	351	106	126	-119	520	100	339	-81	752	206	465	-81
77	1990/1991	464	138	116	-211	671	136	326	-208	924	274	442	-208
78	1991/1992	311	152	75	-84	420	89	319	-13	648	241	394	-13
79	1992/1993	307	122	103	-82	437	76	356	-5	662	199	459	-5
80	1993/1994	361	119	116	-127	535	100	347	-88	769	218	463	-88
81	1994/1995	358	149	86	-123	459	125	253	-81	694	274	339	-81
82	1995/1996	321	125	103	-93	404	78	337	10	631	202	440	10
83	1996/1997	247	73	139	-35	273	77	276	81	484	150	415	81
84	1997/1998	399	111	130	-158	484	78	373	-33	724	189	502	-33
85	1998/1999	340	121	109	-109	483	103	316	-65	714	224	425	-65
86	1999/2000	330	133	97	-100	432	73	361	2	662	206	457	2
87	2000/2001	377	118	119	-140	454	78	358	-17	691	196	478	-17
88	2001/2002	308	132	94	-82	389	89	304	3	615	221	397	3
89	2002/2003	281	112	108	-61	343	78	307	42	563	189	416	42
90	2003/2004	326	106	122	-98	422	93	309	-20	649	199	430	-20

Окончание таблицы 2.3

n	Годы	PВ	RB (IV-VI)	ЕВ	$\Delta VВ$	PM	RM	EM	ΔVM	РГ	RG	EG	$\Delta VG = \Delta VB$
91	2004/2005	350	102	130	-119	314	101	240	27	546	202	370	27
92	2005/2006	308	131	94	-83	410	68	361	19	636	200	455	19
93	2006/2007	345	92	138	-115	424	105	281	-38	654	197	420	-38
94	2007/2008	295	107	115	-73	408	86	320	-3	630	192	435	-3
95	2008/2009	245	94	119	-32	321	100	245	24	533	194	364	24
96	2009/2010	237	90	121	-26	267	77	272	83	478	167	394	83
97	2010/2011	334	96	133	-106	400	60	376	36	628	155	509	36
98	2011/2012	340	95	135	-111	459	66	389	-4	688	161	524	-4
99	2012/2013	310	113	112	-85	440	95	314	-31	665	208	426	-31
100	2013/2014	302	125	99	-78	297	93	250	46	521	218	349	46
101	2014/2015	320	84	141	-94	422	69	366	12	648	153	507	12
102	2015/2016	355	88	143	-123	424	94	308	-22	655	182	452	-22
103	2016/2017	360	116	118	-126	444	74	364	-6	678	190	482	-6
104	2017/2018	309	117	108	-84	347	116	220	-11	572	233	327	-11
105	2018/2019	305	111	113	-81	413	75	346	8	637	186	459	8
106	2019/2020	357	80	151	-125	390	137	191	-62	622	217	343	-62
107	2020/2021	287	102	118	-67	369	78	320	28	589	180	438	28
среднее		326	116	112	-98	431	74	357	0	659	190	469	0
срkwоткл		45	24	20	37	77	21	46		83	34	49	
Cv		0,14	0,21	0,18	-0,37	0,18	0,28	0,13		0,13	0,18	0,10	
r[1]		0,05	0,20	0,16	0,06	0,15	0,39	0,32		0,16	0,46	0,30	

*Примечание: n – число лет наблюдений; i – порядковый номер от 1 до n; PВ – сумма осадков, формирующих сток весеннего половодья; RB(IV-VI) – сток весеннего половодья; ЕВ – суммарное испарение за весенний период; $\pm \Delta VВ$ – изменение («+» сработка, «-» накопление) весенних бассейновых влагозапасов в зоне активного водообмена в i -ом году; PM – сумма осадков, формирующих сток меженного периода плюс весенние бассейновые влагозапасы участвующие в формировании испарения и стока меженного периода; RM – сток меженного периода; EM – суммарное испарение за межень; $\pm \Delta VM$ – изменение бассейновых влагозапасов межени, мм/сезон.

2.3. Бассейн р. Волги как модель природной системы.

Бассейн Волги – огромный по территориальному охвату район, имеющий вполне определенные физико-географические, гидролого-водохозяйственные и социально-экономические признаки. Волга собирает воду с территории площадью 1380 тыс. км². Протяженность бассейна с севера на юг 1910 км, а с запада на восток – 1805 км. При этом сток с его территории поступает не в Мировой океан, а в расположенные в пределах региона внутренние водоем – Каспийское море (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Бассейн реки Волги

Другим немаловажным отличительным признаком является то, что река Волга протекает по трем ярко выраженным зонам – лесным, лесостепным и степным зонам. Наиболее крупный приток Волги – река Кама – имеет длину 2030 км и водосборную площадь 522 тыс. км², второй по величине приток – это река Ока – соответственно 1480 км и 246 тыс. км². На долю Камы и Верхней Волги приходится примерно 95% стока Волги у г. Волгограда. Вклады Камы и Верхней Волги почти равны. В административном отношении территория бассейна Волги относится к Европейской части Российской Федерации. На территории областей и республик, примыкающих к стволу Камы и Волги (площадь около 950 тыс. км²) проживает около 60 млн. человек.

Природные условия. Бассейн Волги расположен между 50 и 60 с. ш. и 30 и 60 в. д. и занимает 1/3 часть территории Русской равнины. По физико-географическому районированию бассейн Волга расположен в Волго-европейской равнине, Уральских горах и Среднеазиатской равнине. На севере-западе Русской равнины расположена Валдайская возвышенность, в пределах которой находятся истоки многих рек, в том числе Волги, Западной Двины, Днепра и др. В западной и центральной частях бассейна лежат обширные по площади и меридионально вытянутые Среднерусская и Приволжская возвышенности. По геологическому строению и ландшафту особенно выделяются Жигули на правом берегу Волги.

Растительность бассейна довольно разнообразна – от полярной карликовой березы в северных широтах до лотоса в устьевой области Волги. Южная граница лесов, преимущественно хвойных. В районах лесостепи встречаются лиственные леса с преобладанием дуба, а на песчаных почвах растет сосна. В Прикаспийской низменности по берегам Волги располагаются обширные песчаные пустынные ландшафты, почти лишенные растительности.

Бассейн Волги расположен в пределах умеренного климатического пояса с четко выраженной широтной зональностью, здесь особенно значительно влияние Атлантического океана. В пределах Уральской горной страны сказывается влияние высотной зональности. Главные различия отдельных климатических областей

связаны с особенностями радиационного режима и преобладающими типами атмосферной циркуляции. Основным критерием, определяющим особенности климата той или иной территории, считается показатель увлажненности, т.е. соотношение количества осадков и испаряемости. По этому критерию основная часть водосборного бассейна Волги относится к полосе достаточной увлажненности, кроме юго-западной ее части, где она невелика. В целом климат характеризуется как умеренно-прохладный, континентальный.

Ослабления циклонической деятельности и обильная инсоляция служат причиной засухи в Поволжье и Прикаспийской низменности. Повторяемость засухи здесь составляет 30%. Особенно тяжелые для сельского хозяйства условия создаются, когда засуха начинается весной и продолжается в течение всех летних месяцев.

Гидрография. Гидрографическую сеть бассейна Волги составляют более 150 тыс. водотоков длиной более 10 км и 35 тыс. озер. Площадь бассейна Волги равна 1380 тыс. км² (39% площади всего бассейна Каспия). Хотя Волга и формирует свой сток в пределах Русской равнины и западного склона Уральских гор, тем не менее для нее также выделяются зоны формирования и потерь стока. Зона формирования охватывает территорию бассейна до г. Волгограда (площадь 1360 тыс. км²), зона потери стока расположена ниже этого створа и включает Волго-Ахтубинскую пойму и дельту Волги. Распределение, густота и структура речной сети значительно изменяется по территории. Особенно разветвлена речная сеть в западной, северной и северо-восточной частях бассейна, расположенных в пределах лесной зоны Русской равнины и в предгорьях Урала. Ниже впадения реки Камы значительно сокращается речная сеть и Волга ниже Волгограда практически не принимает ни одного притока. Почти все реки этой части бассейна представляют собой замкнутые речные системы, которые заканчиваются либо озерами, либо теряются в степи и песках. Озера наиболее распространены в северных и северо-западных частях бассейна. К югу их количество уменьшается. На крайнем юге, в Прикаспийской низменности, озера вновь становятся характерной чертой ландшафта.

В бассейне Волги питание рек в основном осуществляется за счет талых снеговых вод. Участие дождевых и подземных вод неоднородно в различных частях бассейна, но всегда меньше доли талых вод. Наибольшее число рек, стекающих со склонов Урала, смешанного типа и с преобладанием снегового. Для рек бассейна Верхней и Средней Волги снегового питания составляет от 55 до 65% их годового стока. Рекам бассейна Оки с преобладающим снеговым питанием характерна также большая доля дождевых вод по сравнению с подземными. В бассейне Камы доля снеговых вод в питании рек снижается (<60%) из-за увеличения роли дождевого и подземного стока, особенно в тех районах, где развиты карстовые явления. В бассейне Нижней Волги доля снегового питания становится основной.

Гидрологические наблюдения на реках бассейна Волги начинаются с 1810 – 1811 гг., когда были проведены первые измерения расходов воды у г. Ржева, а позднее 1846 – 1849 годах, у г. Астрахани и в рукавах волжской дельты. Благодаря длительным рядам наблюдений (с 1881 г.) водный режим рек Оки, Волги и Камы и их основных притоков изучен достаточно хорошо. Для стока Волги характерна значительная многолетняя изменчивость. Так, например при норме годового стока 253 км^3 размах его колебаний составил более 200 км^3 (от 380 км^3 в 1926 г., до 162 и 169 км^3 соответственно 1921 и 1975 гг.). Как правило, наблюдается чередование многоводных и маловодных периодов. Период с 1926 по 1929 год, когда средний годовой сток составил 333 км^3 сменился маловодным периодом с 1933 по 1940 год, когда он составлял 190 км^3 ; маловодный период с 1972 по 1976 год со среднегодовым стоком 217 км^3 сменился многоводным периодом, который начался в 1978 г. и продолжается до настоящего времени. Такая большая естественная изменчивость водных ресурсов р. Волги требует глубокого анализа и прогноза при планировании водохозяйственных мероприятий. Коэффициент изменчивости (C_V) снижается по мере движения от истока до устья. Так, например, C_V в створе Рыбинска гидроузла составляет 0,26, тогда как в створе Волгоградского гидроузла – 0,18.

Водный баланс бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда в среднем за многолетний период наблюдений составляет: осадки – 665 мм (904 км³/год), речной сток – 189 мм (257 км³/год), испарение – 476 мм (647 км³/год).

Волжская водохозяйственная система. Волжская водохозяйственная система (ВХС) включает в себя Волжско-Камский каскад водохранилищ, Волго-Ахтубинскую пойму и дельту Волги.

Волжско-Камский каскад состоит из водохранилищ, которые имеют свои особенности, зависящие от природных и хозяйственных условий. Иваньковский г/у введен в эксплуатацию в 1937 году. Основное питание Иваньковского водохранилища принадлежит Волге (57%), 25% общего притока дает многоводный левый приток Тверца, получающий сток не только с водосбора Волги, но также воду, сбрасываемую через Вышневолоцкое водохранилище бассейна Балтийского моря; 75% из общего стока в створе Иваньковского г/у сбрасывается в нижний бьеф Углического водохранилища, около 25% в канал имени Москвы и далее через р. Москвы в р. Оку. Углическое водохранилище образовано в результате перекрытия русла Волги плотиной у г. Углич в 1934 – 1943 гг. Это водохранилище долинного типа ограничено склонами долины Волги и характеризуется значительной проточностью. Рыбинское водохранилище заполнено в 1941 – 1947 гг. в результате перекрытия русла р. Волги в районе Рыбинска и русла р. Шексны недалеко от ее устья. Рыбинский г/у состоит из двух отдельных гидросооружений в устье р. Шексны и на р. Волге и осуществляет полное сезонное и частично многолетнее регулирование. Водоохранилище расположено в пределах обширной Молого-Шекснинской низины, которая в период Валдайского оледенения была заполнена огромным озером в 2,5 раза превышающим его современную площадь.

Конфигурация этого озеровидного водохранилища сложная: выделяется центральный плес, ширина которого достигает 56 км и обособленно – Моложский, Шекснинский и Волжский плесы. Нижегородское водохранилище заполнено 1941 – 1947 гг. в результате перекрытия русла Волги выше г. Городца. Водоохранилище руслового типа сложной конфигурации и расположено в 50 км выше г. Нижнего Новгорода.

Далее на участке между г. Городцом и г. Чебоксары протяженностью 312 км сооружено Чебоксарское водохранилище. По гидрографическим особенностям его можно разделить на три участка: верхний – от плотины Нижегородского г/у до устья Оки, средний – между устьями Оки и Суры и нижний – от устья Суры до Чебоксар. Из 28 рек, впадающих в Чебоксарское водохранилище, наибольшие правые притоки – Ока и Сура, а левые притоки – Керженец и Ветлуга. Куйбышевский г/у образует одно из крупнейших в мире долинных водохранилищ. Водоохранилище ведет сезонное регулирование стока. Полезная емкость составляет 33,6 км³. Это позволяет практически полностью (97%) регулировать сток среднего течения Волги. Географическое положение данного водохранилища и значительная емкость обеспечивает возможность осуществлять компенсирующее регулирование стока р. Волги, благодаря которому увеличивается расход воды в низовьях Волги по сравнению с естественными условиями. Кама – это основная река, впадающая в Куйбышевское водохранилище. Она зарегулирована тремя водохранилищами: Камское, Воткинское и Нижнекамское. Камский г/у – верхний в Камском каскаде и расположен в 12 км выше г. Перми. Полезная емкость водохранилища около 10 км³, она расходуется на поддержание судоходных глубин. Общее количество притоков превышает 40, самый большой из них – левый р. Тулва. Нижнекамское водохранилище образовано плотиной близ Набережных Челнов. Из множества рек, впадающих в Нижнекамское водохранилище, можно выделить два больших притока: р. Иж (правый приток) и р. Белая (левый приток).

В пределах Нижней Волги расположены Саратовское и Волгоградское водохранилища. От плотины Куйбышевского г/у на север до плотины Саратовского г/у протяженность участка Волги составляет около 348 км. Саратовское водохранилище – типичное водохранилище руслового типа. Приточность к нему незначительная – наибольший правобережный приток р. Сызранка, с левого берега на северо-востока в пределах Самарской Луки впадает р. Сок. В нижней части водохранилища притоки многоводны лишь в период половодья. Волгоградское водохранилище – самая нижняя ступень Волжского каскада. Оно расположено между плотинами Саратовского и Волгоградского

каскада г/у. Большая часть Волгоградского водохранилища расположена в степной зоне.

Волго-Ахтубинская пойма длиной 450 км, простирается до вершины дельты, ее ширина от 15 до 45 км, площадь около 7500 км². Волго-Ахтубинская пойма и дельта реки среди окружающей полупустыни и пустыни образуют своеобразный оазис. Волго-Ахтубинская пойма и дельта прорезаны многочисленными водотоками, суммарная длина которых 4800 км. Площадь дельты более 12 тыс. км² и меняется в зависимости от многолетних колебаний Каспийского моря.

В связи с созданием каскада водохранилищ были построены каналы как одноцелевого, так и многоцелевого использования. Так, в 1937 г. был построен канал имени Москвы длиной 128 км комплексного назначения как источник водоснабжения Москвы. В 1952 г. построен Волго-Донской судоходный канал, соединивший Волжский бассейн с Азовским и Черным морями.

Основной особенностью современного периода является колоссальный антропогенный пресс на природные ресурсы бассейна Волги. При решении задач оптимального использования водных ресурсов и создания благоприятных условий для обитания рыбного стада Волги-Каспия возникают проблемы экологического и социально-экономического характера.

Современное потребление водных ресурсов в бассейне Волги показывает, что в целом безвозвратное водопотребление на водосборе с учетом потерь на испарение с поверхности водохранилищ (5,5 – 7,0 км³/год) оценивается в 17 – 18 км³/год, что составляет около 7% нормы годового стока р. Волги [60]. В настоящее время основное противоречие возникает между энергетикой и специальными попусками (рыбными и сельскохозяйственными), осуществляемыми в период половодья в нижний бьеф Волгоградской ГЭС. Однако резкий спад объемов водопотребления внерусловых участников Волжской ВХС, наблюдающийся с 1990 г. создает достаточно благоприятные условия смягчения этого противоречия.

2.4. Анализ сценариев возможного изменения климата и его влияние на ЭВБ бассейна реки Волги

Процесс непрерывного изменения климата подтвержден историей существования планета Земля. В настоящий момент необходимо определить, насколько значимы изменения и как они отразятся на тех процессах, которые происходят в окружающей среде. Это может привести к качественным и количественным изменениям ЭВБ, а также к развитию гидрологических процессов в речном бассейне. Есть мнение, что речной сток является возобновляемым водным ресурсом, который может быть получен из климата. В свою очередь, водные ресурсы количественно выражаются функциями параметров климата. В результате становится ясно, что одной из основных целей гидрологии в XXI веке является изучение возможных изменений стока рек, которые зависят от климатических факторов.

В настоящее время, Межправительственная группа экспертов по изменению климата («МГЭИК») приняла участие в разработке долгосрочных сценариев эмиссии парниковых газов и аэрозолей в атмосфере на протяжении XXI века, которые были опубликованы в специальном докладе о сценариях климата [21], а в работах [49, 65, 97] подготовлены специальные доклады о влиянии изменения глобального климата и воздействии этих изменений на климат в Российской Федерации.

На каждом шаге интегрирования ансамбля «МОЦАО» (Модели общей циркуляции атмосферы и океана) рассчитывается огромное количество параметров, описывающих термодинамическое состояние атмосферы, гидросферы и деятельного слоя почвы. У исследователей, которые используют результаты этих расчетов складывается уверенность, что по выходным данным численных климатических экспериментов можно определить большинство гидрометеорологических параметров, включая и речной сток. В действительности это далеко не так. Во-первых, качество выходной продукции «МОЦАО» сильно различается и обусловлено тем обстоятельством, что уравнения термодинамики,

лежащие в основе моделей климата хорошо адаптированы к генерации крупномасштабных полей. Во-вторых, разные климатические модели по-своему усмотрению воспроизводят поля атмосферных осадков, суммарного испарения и температуры воздуха. Эти модели также воспроизводят влажность почвы. Однако, проверить правильность этих расчетов крайне затруднено из-за ограниченности доступного эмпирического материала. Для оценки межгодовой и сезонной изменчивости речного стока необходимо определить не только среднемноголетний сток (норма стока), но и дисперсию (или стандарт), включая внутривременные (автокорреляционные) и межвременные корреляционные связи.

В соответствии с первым подходом, учитывая, что ни одна из предложенных моделей не воспроизводит изменения параметров климата, учитывающих современные требования к практике гидрологических расчетов, предлагается использовать ансамбль из нескольких моделей. Во втором подходе выбираем модели, которые наиболее точно воспроизводят особенности климатических условий, которые существовали в последние десятилетия как в целом по всему миру, так и применительно к отдельным регионам и речным бассейнам.

В настоящей работе проанализирована возможность применения климатических сценариев будущего по «МОЦАО», предложенных в третьем (CMIP 3), который включает в себя глобальные модели для формирования роста парниковых газов и аэрозоля SRES A2, SRES A1B, SRES B1 и в пятом (CMIP 5) – RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 (Representative concentration pathways: репрезентативные траектории концентраций, соответствующие величине антропогенного радиационного воздействия, достигаемого к 2100 года, а именно 2.6, 4.5 и 8.5 Вт/м²) оценочных докладах МГЭИК [21, 49, 97] для оценки возможной динамики изменения осадков и температуры воздуха на территории России в XXI веке. Данные сценарии базируются на обширном перечне экономических, технологических и демографических факторов, которые влияют на эмиссию газов.

Семейство сценариев SRES A1 содержит будущий мир, в котором преобладает динамичный экономический рост и увеличение населения Земли. Эти показатели достигают максимума в середине XXI века и затем постепенно

снижаются с последующим уменьшением, что обусловлено быстрым внедрением новых технологий и их более эффективным применением.

В соответствии со сценарием SRES A2 процесс развития мира направлен на сохранение местной самобытности и использования в качестве основы природных ресурсов, а также постоянный рост числа жителей планеты. Таким образом, в результате этого развития ожидается дальнейшее увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере.

В начале сюжета сценария SRES B1 описывается мир с таким же глобальным населением, как и в сюжетной линии A1. В середине XXI века оно достигает максимальной численности. Затем оно начинает уменьшаться, но при быстрых изменениях в экономике, которые направлены на цифровую экономику, где происходит уменьшение интенсивности труда, а также внедрение экологически чистых и ресурсосберегающих технологий.

В настоящий момент, SRES A2 является одним из самых «жестких» сценариев, SRES A1B – «промежуточный» и SRES B1 – «мягкий». Кроме этих сценариев, нами также рассматриваются сценарии пятого поколения (CMIP 5) [97].

С помощью моделирования были получены результаты для семи МОЦАО, которые применимы к бассейну реки Волги, которые приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Показатели водного баланса бассейна реки Волги по результатам МОЦАО для современного климата [94].

№ п/п	Модель МОЦАО	Осадки мм/год	Испарения мм/год	Сток мм/год
1	CCC2	798	598	200
2	CCSR1	742	564	178
3	ECHAM3	591	434	157
4	GEN2	437	340	97
5	LMC5	704	591	113
6	MRI2	756	628	128
7	UGAMP	418	258	160
8	Среднее	635	488	148

Речной сток по моделям МОЦАО определяется как разность осадков и испарения, различие составляет от 97 мм/год (модель GEN2) до 200 мм/год (модель CCC2), в км³/год – от 132 до 272, т.е. различия составляют 70%.

В таблицах 2.5 и 2.6 рассчитаны возможные изменения климата с помощью ансамбля «МОЦАО», который включают в себя модели для сценариев роста газов и аэрозоля SRES B1, A1B и A2 и для RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5. Следует отметить, что для разных сценариев доступно разное количество моделей, однако во всех случаях исходим из критерия достаточности, с точки зрения репрезентативности. При этом изменение (среднее за 20 лет значения климатических характеристик) определены для 2011-2030 годов и для 2041-2060 годов.

Таблица 2.5 – Среднегодовое значение температуры приземного воздуха (\bar{T} , °C), годовые атмосферные осадки (\bar{P} , мм/год) и суммарное испарение (\bar{E} , мм/год) в бассейне реки Волги по новому поколению ансамбля моделей CMIP3.

Версия	Сценариев SRES A2						Сценариев SRES A1B						Сценариев SRES B1					
	2011-2030			2041-2060			2011-2030			2041-2060			2011-2030			2041-2060		
	\bar{T}	\bar{P}	\bar{E}	\bar{T}	\bar{P}	\bar{E}	\bar{T}	\bar{P}	\bar{E}	\bar{T}	\bar{P}	\bar{E}	\bar{T}	\bar{P}	\bar{E}	\bar{T}	\bar{P}	\bar{E}
Версия 1	4,26	687	475	5,79	705	477	4,38	683	475	6,08	715	477	4,54	690	476	5,38	700	477
Версия 2	4,43	692	499	6,03	715	520	4,53	688	496	6,33	732	527	4,73	696	503	5,63	708	514

Примечание: Версия 1 – базовый климатический период 1980-2000 гг. $\bar{T} = 3,9^{\circ}\text{C}$, $\bar{P} = 690$ мм/год; Версия 2 – базовый климатический период 1914-2000 гг. $\bar{T} = 3,4^{\circ}\text{C}$, $\bar{P} = 670$.

Таблица 2.6 – Среднегодовое значение температуры приземного воздуха (\bar{T} , °C), годовые атмосферные осадки (\bar{P} , мм/год) и суммарное испарение (\bar{E} , мм/год) в бассейне реки Волги по новому поколению ансамбля моделей CMIP5.

Версия	Сценариев RCP2.6						Сценариев RCP4.5						Сценариев RCP8.5					
	2011-2030			2041-2060			2011-2030			2041-2060			2011-2030			2041-2060		
	\bar{T}	\bar{P}	\bar{E}	\bar{T}	\bar{P}	\bar{E}	\bar{T}	\bar{P}	\bar{E}	\bar{T}	\bar{P}	\bar{E}	\bar{T}	\bar{P}	\bar{E}	\bar{T}	\bar{P}	\bar{E}
Версия 1	4,68	690	476	5,41	710	476	4,68	690	476	5,99	715	477	4,81	695	476	6,71	720	478
Версия 2	4,93	695	504	5,63	719	526	4,93	701	509	6,23	724	509	5,03	701	519	6,93	728	535

Примечание: Версия 1 – базовый климатический период 1980-2000 гг. $\bar{T} = 3,9^{\circ}\text{C}$, $\bar{P} = 690$ мм/год; Версия 2 – базовый климатический период 1914-2000 гг. $\bar{T} = 3,4^{\circ}\text{C}$, $\bar{P} = 670$ мм/год;

Выводы по второй главе

1. Устойчивое развитие экономики Волжского региона во многом определяется рациональным функционированием водохозяйственной системы бассейна реки Волги, которое в большей степени зависит от того насколько достоверно и точно определяются ЭВБ бассейна р. Волги, особенно гидрологические характеристики данного бассейна. Методика позволяет замкнуть систему уравнений и получить 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 исследовании приводятся результаты расчета элементов водного баланса бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда для периодов 1891/1892 – 2020/2021 гг. (n=130 лет) и 1914/1915 – 2020/2021 гг. (n=107 лет), полученные по алгоритму расчета.

2. В основе водных ресурсов речного бассейна лежат характеристики климатической системы. Для оценки межгодовой и сезонной изменчивости ЭВБ речного бассейна необходимо опираться с одной стороны на описание возможных изменений регионального и глобального климата, а с другой – физики развития гидрологических явлений. 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. Достаточно отметить, что Волга собирает воду с территории площадью 1380 тыс. км², охватывающей наиболее развитые в промышленном отношении области и республики европейской части России.

3. В настоящее время «МГЭИК» разработаны ансамбли моделей циркуляции атмосферы и океана («МОЦАО»). Установлено, при сравнении данных о влиянии предстоящих изменений в климате на климат России, используя климатические сценарии будущего по «МОЦАО», рассмотренные в третьем (СМIP3) и в пятом (СМIP5) оценочных докладах МГЭИК можно сделать вывод, что в бассейне Волги они приводят к существенным изменениям ЭВБ и притока к замыкающему водоему. Поэтому, углубленное изучение пространственной и временной изменчивости ЭВБ и их взаимосвязи позволит точнее дать оценку водным ресурсам и их режимам в изменяющихся условиях климата и хозяйственной деятельности XXI века и при этом будет иметь большое влияние на оценку водных ресурсов и их режимов, что своевременно позволит усовершенствовать правила управления режимами Волжско-Камского каскада водохранилищ.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЛЕТНИХ И ВНУТРИГОДОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА БАССЕЙНА ВОЛГИ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА И ДИНАМИКИ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ В XX ВЕКЕ.

3.1. Сравнительный ретроспективный анализ закономерностей многолетних и внутригодовых колебаний ЭВБ бассейна реки Волги

При анализе закономерностей динамики ЭВБ, в концепции речного бассейна, с одной стороны, он рассматривается как единый индикативный объект, а с другой – как совокупность различных природных ландшафтов и ландшафтов, подверженных антропогенным изменениям в результате деятельности человека, каждый из которых вносит свой вклад в формирование количественного и качественного состава ЭВБ. Изменение структуры водного баланса территории происходит в результате воздействия разных режимов осадков и нагрузок на ландшафт. Различные сочетания природных и антропогенных факторов, включая антропогенные, и определяют многообразие реакции речных водосборов на осадки одинаковой интенсивности. Развитие выпадения осадков на территорию речного бассейна описывается случайной функцией, зависящей от времени, т.е. функцией, значения которой в любой момент времени являются случайными величинами. В результате последовательность значений ЭВБ, полученных в равностоящих моментах времени, является динамическим или временным рядом, а соответствующая ему – модификация вероятностной модели является случайным процессом с дискретным временем.

В связи с применением статистических методов для анализа выявления закономерностей многолетних колебаний гидрологических характеристик речного бассейна основной задачей является установление границ гидрологического года и определение периода, в течение которого оцениваются осадки и речной сток. В исследовании, проведенном А.Г. Булавко [33] говорится, чтобы определить

границы времени годового стока, необходимо учитывать, что в течение этого периода времени на водосборе завершается цикл наполнения и расходования воды, при этом между водным потоком и осадками должна быть наиболее тесная связь. Применительно к бассейну реки Волги гидрологический год начинается с первого апреля текущего года и заканчивается в конце марта следующего года, а годовой цикл осадков с первого ноября предшествующего года до октября текущего года. Это связано с тем, что для рек бассейна Волги характерно сильное половодье, оно приходится на начало апреля, так как зимний снег, который накопился с ноября по март, постепенно тает. Твердые осадки, в отличие от жидких, вступают в гидрологический цикл с большим запаздыванием (4-5 месяцев). Сначала они аккумулируются в виде снега, а затем весной (начало апреля) участвуют в гидрологическом цикле формирования стока.

Среднемноголетнее значение годовых осадков (по данным Мирового центра данных МЦД – meteo.ru – Российский гидрометеорологический портал) составило за период 1891/1892 – 2020/2021 гг. 665 мм/год, тогда как предельные показатели составили 916 мм/год (1989/1990 г.) и 471 мм/год (1995/1996 г.). Среднеквадратическое отклонение составило 77 мм/год, коэффициент вариации 0,12, а автокорреляция осадков смежных лет 0,06.

В зоне формирования у г. Волгограда, где течет река Волга в своем естественном русле, были рассмотрены две версии временного ряда годового стока (данные АО «Институт Гидропроект») наблюдаемая (измеренная) и условно-естественная (восстановленная). Одинаковы годовые стоки двух версий одного и того же периода 1881/1882 – 1934/1935 гг. Рассматривая период 1935/1936 – 2000/2001 гг. видим, что в первой версии отображается интегральное воздействие антропогенных факторов на речной сток бассейна Волги. Кроме того, были проанализированы стоковые ряды бассейна Волги за период с 1914/1915 по 2020/2021 годы (условно-естественный сток данные АО «Институт Гидропроект»). По этим рядам, наряду с годовыми анализируются и сезонные (половодье и межень) изменения стока реки Волги в зоне формирования у Волгограда.

Для оценки изменения водных ресурсов бассейна реки Волги как в ближайшем времени, так и в будущем, необходимо провести сравнительный ретроспективный анализ ЭВБ таких, как осадки (P), суммарное испарение (E), речной сток (R) и бассейновые влагозапасы ($\pm\Delta V$). Кроме этих ЭВБ для сравнительного анализа были включены такие параметры как температура приземного слоя воздуха (T), эффективные осадки, которые участвуют в формировании речного стока ($P-E$) и эффективные осадки, которые формируют суммарное испарение ($P-R$). Как уже отметили, благодаря существующим опорным гидрологическим и метеорологическим станциям в нашем распоряжении имеются длительные временные ряды осадков и речного стока в современном климате (базисный период – 1881/1882 – 2020/2021 гг.). Рассматриваются две версии речного стока: условно-естественный сток Волги в зоне формирования у Волгограда за период 1881/1882 – 2020/2021 гг. и версия фактического (наблюденного) стока – 1881/1882 – 1999/2000 гг. Кроме этого, для условий современного климата (базовый период) для сравнительного анализа используется условно-естественный сток Волги в зоне формирования у Волгограда за период 1914/1915 – 2020/2021. Для сравнительного анализа были использованы также температура приземного воздуха для условий современного климата (базовый) за период 1901/1902-2020/2021 гг. Естественно, возникает вопрос получения длительных временных рядов общего испарения и трансформации бассейновых влагозапасов бассейна р. Волги в зоне формирования стока у Волгограда. С этой целью, нами была использована предлагаемая методика. Получены длительные временные ряды для суммарного испарения и трансформации бассейновых влагозапасов бассейна реки Волги в зоне формирования стока у Волгограда для условия современного климата (базовый период) на протяжении двух периодов: период с 1891/1892 – 2020/2021 гг. ($n=130$ лет) и период с 1914/1915 – 2020/2021 гг. ($n=107$ лет). Эти временные ряды ЭВБ бассейна Волги позволили выявить не только межгодовые и сезонные колебания речного стока данного бассейна, но и установить взаимосвязь между речным стоком и ключевыми показателями, влияющими на его формирование (осадки, суммарное испарение и температура

приземного слоя). Для определения тенденций в колебаниях ЭВБ и определяющих их факторов за инструментальный период на первом этапе был проведен анализ динамики временного ряда температуры приземного воздуха водосбора бассейна Волги. При этом, проанализировано наличие устойчивой тенденции (тренда) в многолетних колебаниях среднегодовой температуры воздуха за холодный и за теплый периоды бассейна Волги за период 1901/1902-2020/2021 гг. Водосбор бассейна Волги имеет большую протяженность, поэтому были проанализированы изменения температуры приземного воздуха для Верхней Волги, Средней Волги, Нижней Волги и отдельно реки Камы. Результаты анализа приведены в таблице 3.1, начиная с 1975/1976 года по настоящее время наблюдается тенденция в сторону повышения средней многолетней годовой (нормы) температуры приземного воздуха в бассейне Волги в зоне формирования стока (приращение составляет 1,0 °С). Эти изменения особенно заметны в холодные периоды года (приращение -1,7 °С). В теплый период, наоборот, наблюдается тенденция умеренного повышения нормы температуры приземного воздуха (приращение – 0,6 °С). Сравнение изменений нормы температуры приземного воздуха отдельно по выделенным районам и бассейном Волги, свидетельствует о наличии тенденций синхронности в многолетнем колебании температуры приземного воздуха. При этом, самыми пониженными по температурам приземного воздуха оказались частные водосборы бассейна реки Камы. Как видно из анализа (таблица 3.1) динамики температурного режима водосбора бассейна р. Волги, потепление этой климатической системы в последнюю четверть XX века неоспоримо. По данным источников [15, 49, 65, 69, 94, 95, 97] наблюдается повышение температуры приземного воздуха в бассейне Волги во второй половине XX века. Учёные считают, что основной причиной этого изменения климата является антропогенная эмиссия аэрозолей и парниковых газов, которая будет возрастать в течение XXI века [49, 69].

Таблица 3.1 – Изменение температуры приземного воздуха, среднегодового, холодного и теплого периода (°С) бассейна Волги в зоне формирования стока за период 1901/1902 – 2020/2021 гг. (климатический год XI-X, холодный период XI – III, теплый период IV – X).

№ п/п	Водосборы	Периоды	Температура °С		Приращение °С (в %-ах)
			Период 1901/1902- 1975/1976	Период 1976/1977- 2020/2021	
1	Волга – зона формирования у г. Волгограда	Год	3,2	4,2	1,0 (31)
		Холодный	-8,9	-7,2	-1,7 (20)
		Теплый	11,8	12,4	0,6 (5)
2	Верхняя Волга	Год	3,5	4,4	0,9 (26)
		Холодный	-7,1	-5,7	-1,4 (20)
		Теплый	11,1	11,6	0,5 (5)
3	Средняя Волга	Год	3,4	4,2	0,8 (24)
		Холодный	-8,8	-7,5	-1,3 (15)
		Теплый	12,1	12,6	0,5 (4)
4	Нижняя Волга	Год	4,7	5,8	1,1 (24)
		Холодный	-8,9	-7,1	-1,8 (20)
		Теплый	14,5	15,1	0,6 (4)
5	Кама	Год	1,4	2,4	1,0 (71)
		Холодный	-11,6	-9,8	-1,8 (16)
		Теплый	10,7	11,1	0,4 (4)

Выражения многолетних колебаний годовых и сезонных величин ЭВБ представлены на рисунках 3.1 – 3.4. Чередование аномальных лет и их групп в многолетних колебаниях сезонных и годовых составляющих водного баланса характерно для всех гидрометеорологических характеристик (по атмосферным осадкам повышенных и пониженных интервалов валовой увлажненности территории, по речному стоку маловодных и многоводных лет и их групп и т.п.). Так, например, в колебаниях годовых атмосферных осадков и осадков периода межени наблюдается синхронный характер и тенденция повышения атмосферных осадков в начале XX века и после 1975 года, в период половодья не наблюдается четкой тенденции к повышению или понижению осадков в атмосфере. Происходит

увеличение атмосферных осадков начиная с 1914/1915 по 1929/1930 года (первый интервал) и с 1978/1979 – 2001/2002 гг. (второй интервал). В этих интервалах среднегодовые значения атмосферных осадков составляют 699 и 696 мм/год при климатической норме 665 мм/год (таблица 3.2). Эти же интервалы характеризуются повышенной водностью и соответственно среднегодовой сток составляет 205 мм/год ($279 \text{ км}^3/\text{год}$) и 210 мм/год ($286 \text{ км}^3/\text{год}$) при норме речного стока в базовый период – 189 мм/год ($257 \text{ км}^3/\text{год}$). Анализ величины испарения этих интервалов показывает, что испарение колеблется близко к климатической норме, которая составляет 476 мм/год (таблица 3.2). Как хорошо видно на рисунках 3.1 и 3.2 изменение бассейновых влагозапасов в первом интервале имеет симметричный характер, то есть наполнение и сработка примерно одинаковые. Во втором интервале преимущество имеет процесс наполнения. Сезонные запасы воды в бассейнах имеют способность к накоплению во время весеннего половодья, а в период межени происходит их сработка и это приводит к тому, что годовой баланс стремится к нулю. В период половодья влагозапасы изменяются от 30 мм в год ($41 \text{ км}^3/\text{год}$) до 163 мм в год ($222 \text{ км}^3/\text{год}$, в начале XX века) и от 26 мм/год ($35 \text{ км}^3/\text{год}$) до 211 мм/год ($289 \text{ км}^3/\text{год}$, в последней четверти XX века). Накопленные влагозапасы в половодье в дальнейшем участвуют в формировании дополнительного испарения и стока во время межени, что способствует повышению уровня водообеспеченности территории бассейна реки Волги. Преимущество предлагаемого метода, видно, из следующего. С помощью моделей «МОЦАО» можно проанализировать изменения глобальной (региональной) температуры воздуха, атмосферных осадков и испарения. Для оценки речного стока обычно используют разность осадков и испарения. Такой подход не применим для определения стока отдельных лет.

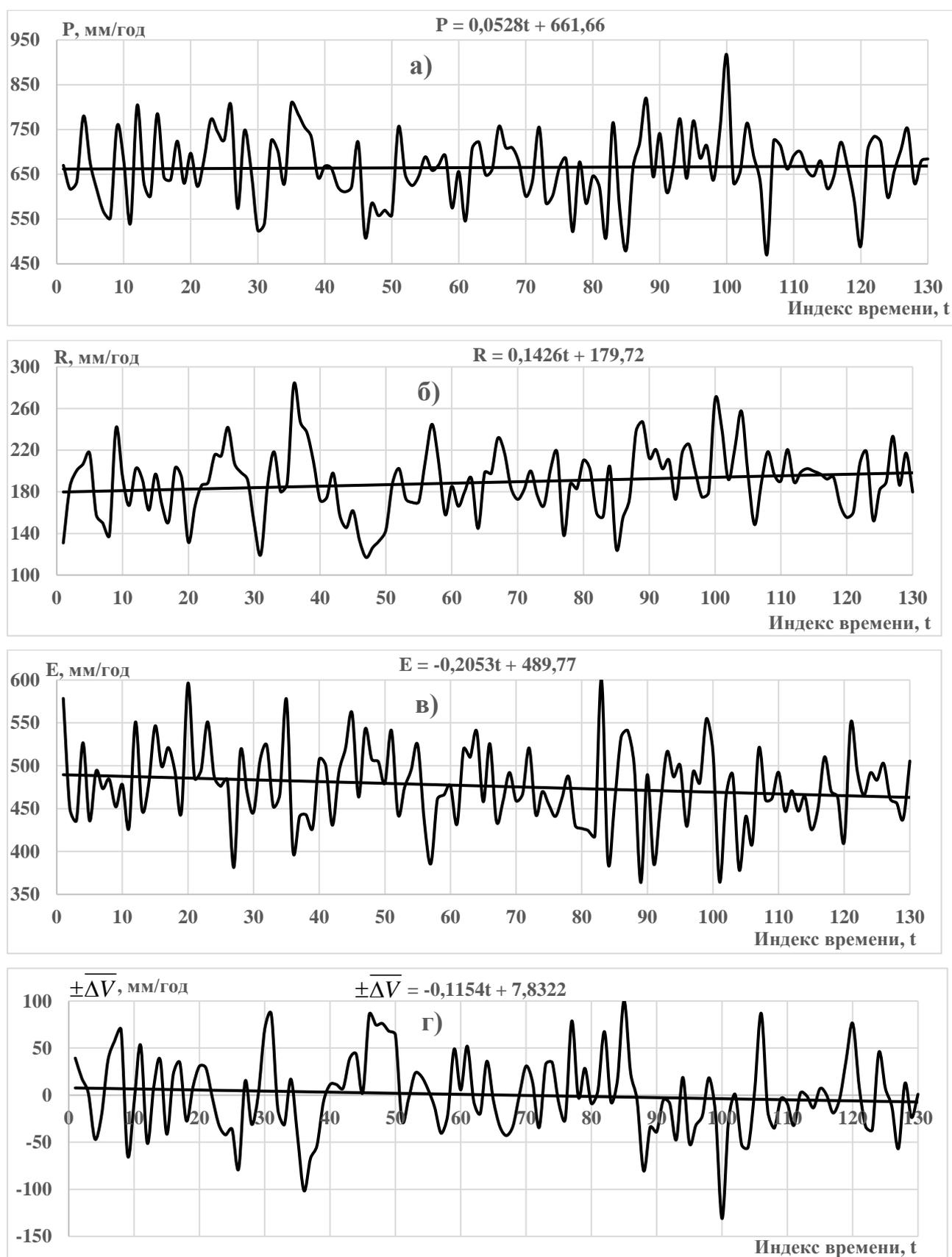


Рисунок 3.1 – Многолетние колебания годовых ЭВБ бассейна р. Волги в зоне формирования за период 1891/1892 – 2020/2021: а) атмосферные осадки (P); б) речной сток (R); в) суммарное испарение (E); г) изменение бассейновых влагозапасов ($\pm\Delta V$).

Для условий современного климата (базовый период): $\bar{P}=665$ мм/год; $\bar{R}=189$ мм/год (257 км³/год); $\bar{E}=476$ мм/год; $\pm\Delta V=0,0$ мм/год.

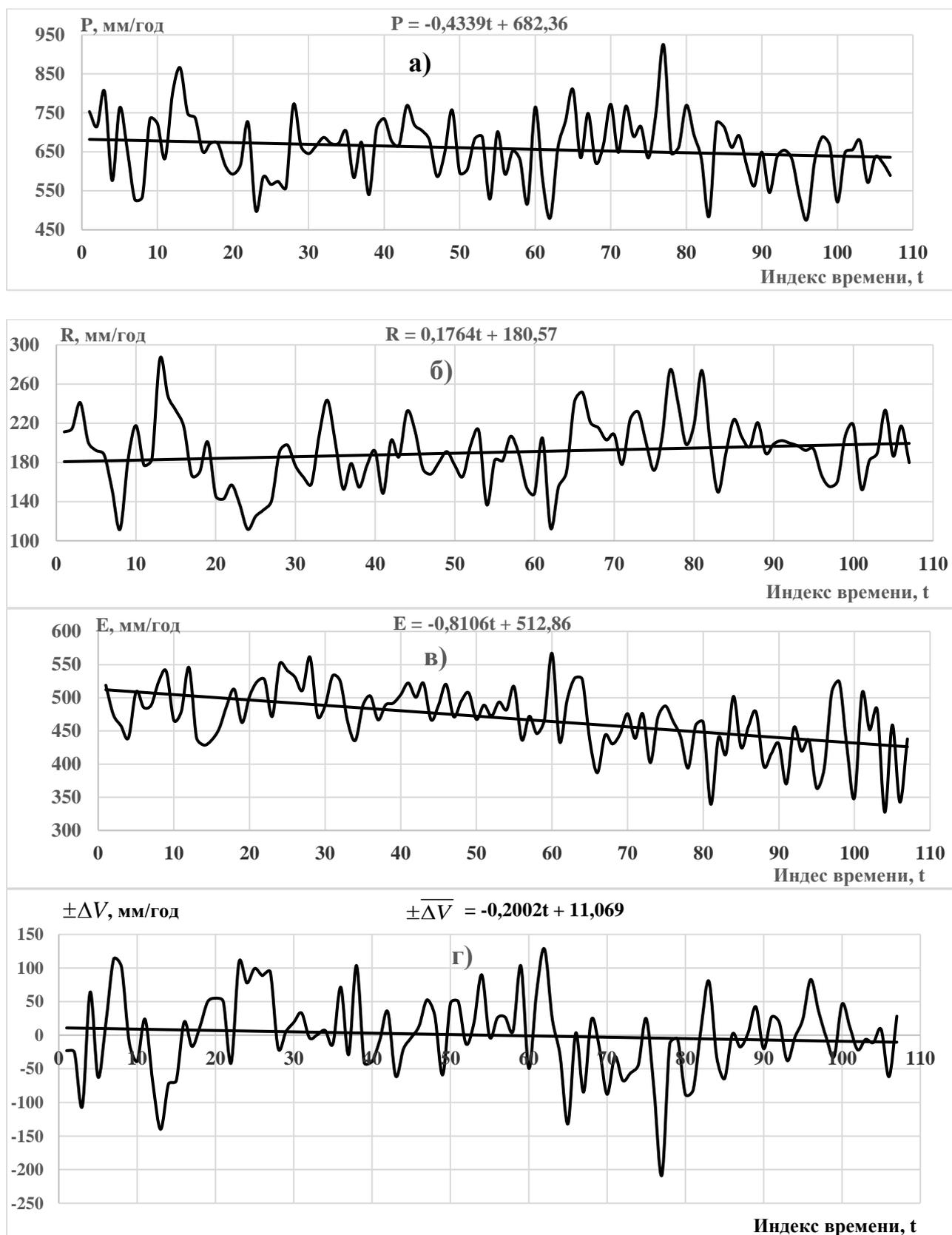


Рисунок 3.2 – Многолетние колебания годовых ЭВБ бассейна р. Волги в зоне формирования за период 1914/1915 – 2020/2021: а) атмосферные осадки (P); б) речной сток (R); в) суммарное испарение (E); г) изменение бассейновых влагозапасов ($\pm\Delta V$).

Для условий современного климата (базовый период 1914/1915-2020/2021): $\bar{P} = 659$ мм/год; $\bar{R} = 190$ мм/год ($258 \text{ км}^3/\text{год}$); $\bar{E} = 469$ мм/год; $\pm\bar{\Delta V} = 0,0$ мм/год.

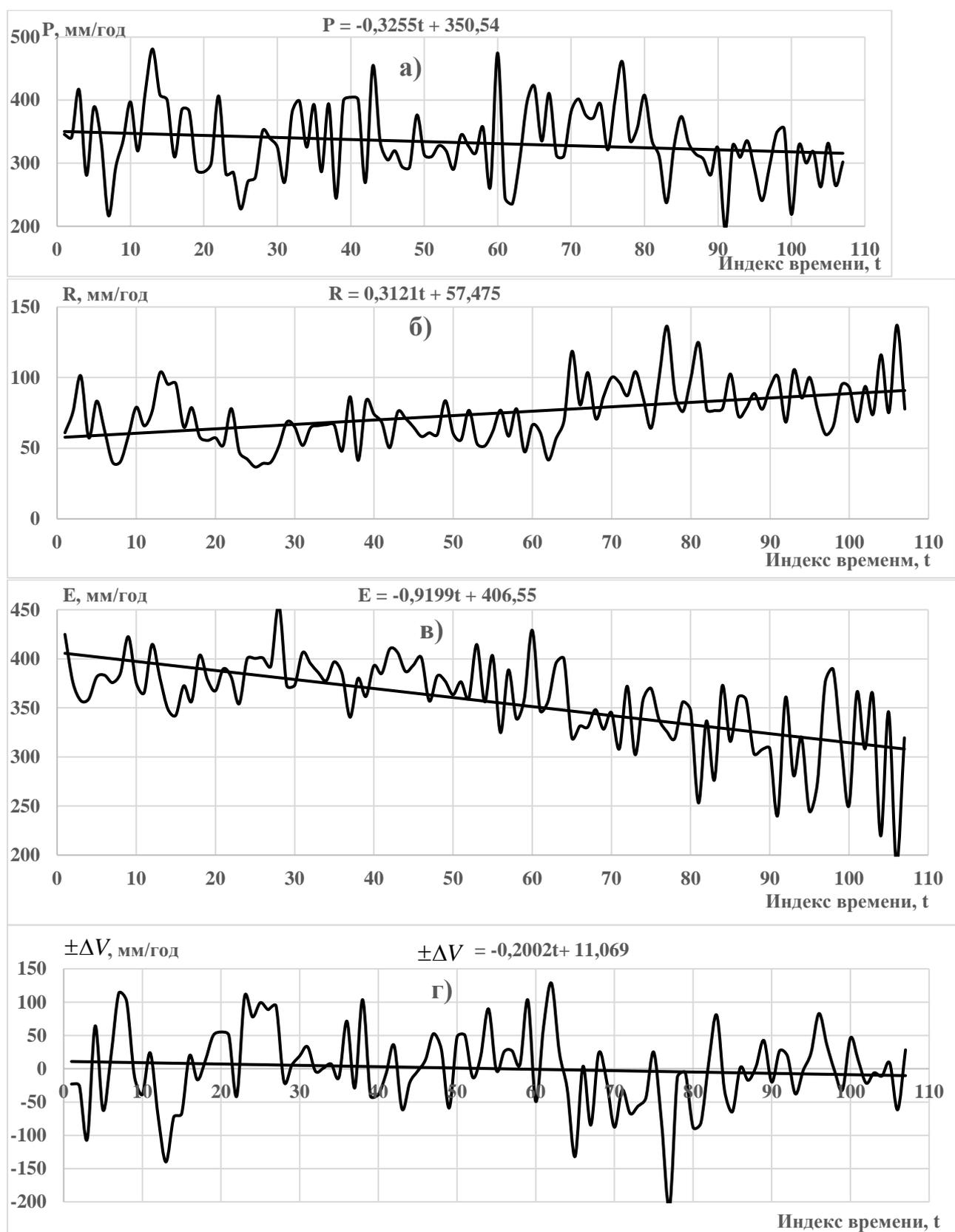


Рисунок 3.3 – Многолетние колебания ЭВБ в период межени бассейна р. Волги в зоне формирования за период 1914/1915 – 2020/2021: а) атмосферные осадки (P); б) речной сток (R); в) суммарное испарение (E); г) изменение бассейновых влагозапасов ($\pm\Delta V$).

Для условий современного климата (базовый период 1914/1915 – 2020/2021): $\bar{P} = 333$ мм/год; $\bar{R} = 74$ мм/год ($100 \text{ км}^3/\text{год}$); $\bar{E} = 357$ мм/год; $\pm\Delta\bar{V} = 0,0$.

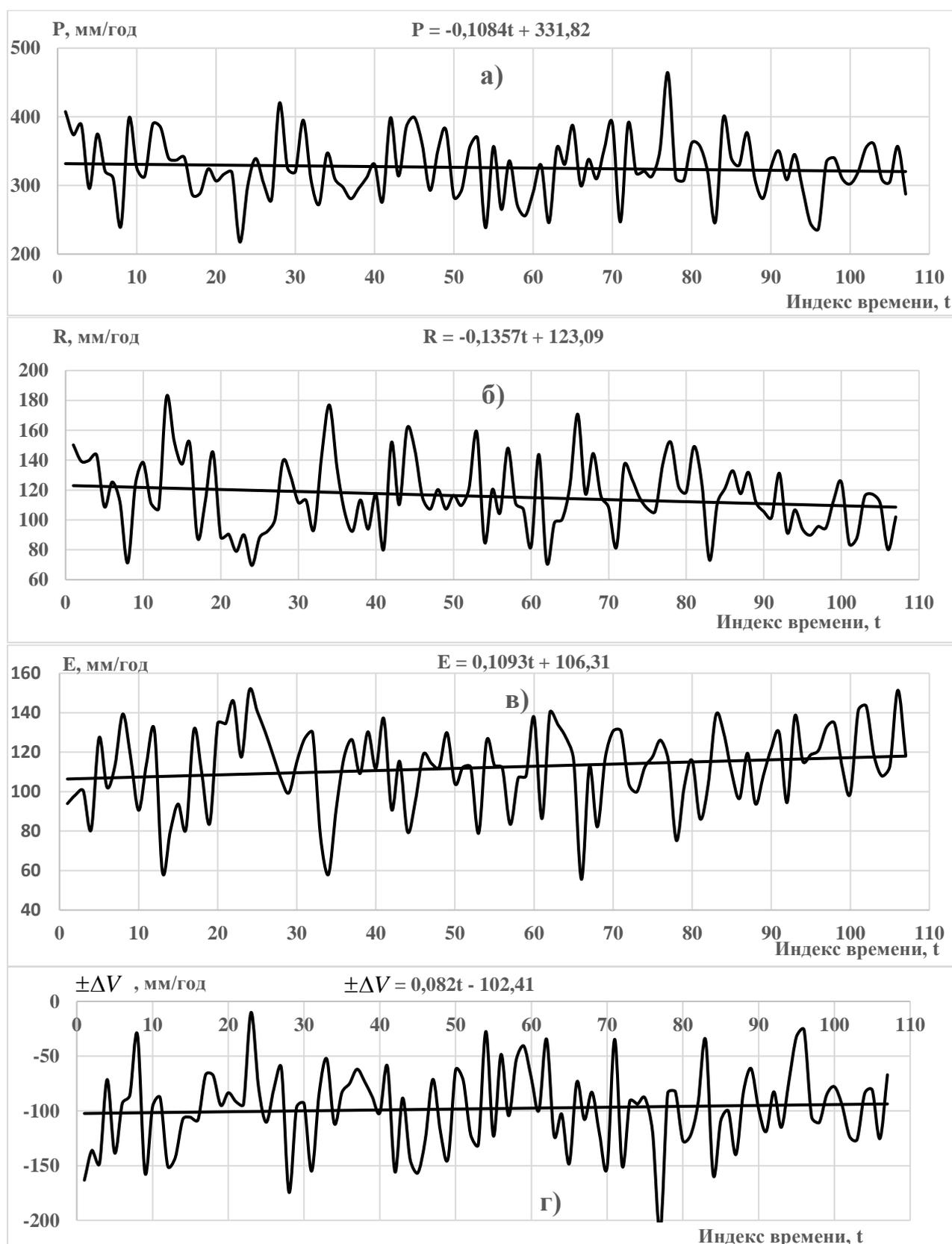


Рисунок 3.4 – Многолетние колебания ЭВБ в период весеннего половодья бассейна р. Волги в зоне формирования за период 1914/1915 – 2020/2021: а) атмосферные осадки (P); б) речной сток (R); в) суммарное испарение (E); г) изменение бассейновых влагозапасов ($\pm\Delta V$).

Для условий современного климата (базовый период 1914/1915 – 2020/2021): $\bar{P} = 326$ мм/год; $\bar{R} = 116$ мм/год ($158 \text{ км}^3/\text{год}$); $\bar{E} = 112$ мм/год; $\pm\bar{\Delta V} = -98$ мм/год.

Таблица 3.2 – Осредненные по пятилетним значениям годовые ЭВБ бассейна р. Волги в зоне формирования до г. Волгограда за период 1891/1892 – 2020/2021 гг.

Периоды	Элементы водного баланса, мм/год			
	P	R	E	$\pm\Delta V$
1891/1892 – 1895/1896	675	188	486	-2
1896/1897 – 1900/1901	634	176	476	18
1901/1902 – 1905/1906	673	184	490	1
1906/1907 – 1910/1911	667	169	511	14
1911/1912-1915/1916	710	194	499	-17
1916/1917-1920/1921	662	198	460	-5
1921/1922-1925/1926	681	178	506	3
1926/1927-1930/1931	717	230	444	-44
1931/1932-1935/1936	648	167	501	21
1936/1937-1940/1941	557	131	500	74
1941/1942-1945/1946	673	181	496	4
1946/1947-1950/1951	650	201	445	-4
1951/1952-1955/1956	657	177	492	11
1956/1957-1960/1961	690	201	474	-15
1961/1962-1965/1966	649	185	471	8
1966/1967-1970/1971	623	187	450	14
1971/1972-1975/1976	591	169	458	36
1976/1977-1980/1981	718	205	486	-27
1981/1982-1985/1986	692	205	469	-19
1986/1987-1990/1991	742	210	495	-37
1991/1992-1995/1996	675	222	428	-26
1996/1997-2000/2001	653	188	469	5
2001/2002-2005/2006	661	202	451	-7
2006/2007-2010/2011	624	181	461	18
2011/2012-2015/2016	683	184	497	-2
2016/2017-2020/2021	690	201	473	-16
Средний	665	189	476	0

В экстремально маловодном 1937-1938 году при атмосферных осадках в 585 мм/год и общем испарении в 543 мм/год оценка годового стока реки Волги по их разности будет 42 мм/год (что почти в два раза меньше фактического стока), тогда как условно-естественный сток года равен 117 мм/год, т. е. в реальных условиях происходит сработка бассейновых влагозапасов, она составляет 75 мм/год.

Как видно из таблиц 3.2, 3.3 и из рисунков 3.1 и 3.2 в многолетних колебаниях годовых объемов стока Волги у Волгограда выделяется продолжительный период

с низким уровнем стока. Этот период делится на два интервала. Первый интервал (1930/1931 – 1945/1946 гг.) характеризуется резким снижением стока до 160 мм/год (218 км³/год), в то время как второй интервал (1946/1947 – 1977/1978) демонстрирует умеренное снижение стока – 185 мм/год (252 км³/год, при климатической норме 257 км³/год). Оба интервала также сопровождаются уменьшением осадков, первый интервал – 628 мм/год, второй – 646 мм/год при климатической норме 665 мм/год и увеличением суммарного испарения, которое в первом интервале достигает значительных величин – 499 мм/год, во втором – 469 мм/год (при климатической норме 476 мм/год). Таким образом, рассмотренный нами период 1891/1892 – 2020/2021 гг. включает в себя полный цикл колебаний годовых ЭВБ бассейна реки Волги. Началу рассматриваемого периода характерно повышение атмосферных осадков и речного стока, затем их длительное снижение, а затем опять период их повышения. В отличие от них суммарному испарению свойственна тенденция к снижению.

Можно сделать вывод, что периоды 1914/1915 – 1929/1930 гг. или 1978/1979 – 2001/2002 гг., отличающиеся экстремально высокими осадками, влияют на формирование речного стока 29% и 30%, а на испарение 68 и 67% атмосферных осадков (таблица 3.3), при сниженных осадках в периоде 1930/1931 – 1945/1946 гг. на формирование стока приходится 25%, а на суммарное испарение – 79% атмосферных осадков. Сравнительный анализ изменчивости ЭВБ бассейна Волги выявляет очевидную закономерность: повышенная водность соответствует периодам увеличенных осадков и сниженного испарения. В то же время, пониженная водность соотносится с уменьшением осадков и увеличением испарения.

Из сравнительного ретроспективного анализа видно, что атмосферные осадки являются важнейшим ЭВБ, которые формируют остальные элементы водного баланса. Подавляющее их количество выпадает на поверхность бассейна р. Волги при прохождении циклонов и лишь незначительная часть – из внутримассовой облачности [18]. Поэтому колебания водности Волги существенно зависят от водности циклонов, выходящих на речные бассейны. Поэтому

выявление влияния прохождения циклонов на структуры и генезисы атмосферных осадков и, соответственно, на водность бассейна р. Волги весьма важны, поскольку позволяют раскрыть причины появления периодов различной водности и прогнозировать изменения водных ресурсов этого бассейна. Существует несомненная связь колебаний водности р. Волги с изменением режима атмосферной циркуляции. Выделяются три формы циркуляции: западная (W), восточная (E) и меридиональная (C). Для Волги выделяются следующие эпохи: 1) 1891/1892 – 1928/1929 гг. (W), 2) 1929/30 – 1939/1940 гг. (E), 3) 1940/1941 – 1948/1949 гг. (C), 4) 1949/1950 – 1972/1973 гг. (E+C), 5) 1973/1974 – 1988/1989 гг. (W+E) [99]. Как видно из таблицы 3.3, при преобладании циркуляции в форме (W) в бассейне Волги отмечаются повышенные осадки (679 мм/год) и увеличивается водность (190 мм/год или 259 км³/год). В случае, если преобладает циркуляция формы E, то будут наблюдаться небольшие осадки (616 мм/год) и сток (157 мм/год). При преобладании циркуляции в форме C, как видно из таблицы 3.3 атмосферные осадки и речной сток ближе к климатической норме и, соответственно, составляют 661 мм/год и 190 мм/год (258 км³/год) (климатическая норма – 665 мм/год и 189 мм/год).

При анализе ЭВБ бассейна р. Волги определенный интерес представляет выделение групп (или серий) лет, которые сопряжены с характерными периодами колебаний Каспийского моря. Так например, как видно из таблицы 3.3 период 1891/1892 – 1929/1930 гг., когда уровень Каспийского моря характеризуется относительно стабильным уровнем, в бассейне р. Волги наблюдалось умеренное повышение атмосферных осадков (678 мм/год при климатической норме 665 мм/год), а сток Волги стремился к климатической норме (190 мм/год или 258 км³/год при климатической норме 189 мм/год или 257 км³/год). В периоды с 1930/1931 – 1941/1942 гг. (катастрофическое снижение уровня моря) и с 1942/1943 – 1969/1970 (замедленное снижение уровня моря) в бассейне р. Волги имеет место катастрофическое снижение как атмосферных осадков (соответственно 620 мм/год и 654 мм/год), так и речного стока (соответственно 153 мм/год или 208 км³/год и 175 мм/год или 238 км³/год).

Таблица 3.3 – Выборочные оценки статистических параметров ЭВБ Волги в зоне формирования у Волгограда с. Дубовка), мм/год, период 1891/1892 – 2020/2021 гг.

Периоды	Число лет	Статистические параметры											
		$P_{\text{ср}}$	σ_P	C_V	$r[1]$	$R_{\text{ср}}$ (в %)	σ_R	C_V	$r[1]$	$E_{\text{ср}}$ (в %)	σ_E	C_V	$r[1]$
а) ряды (естественные), разной продолжительности													
1891/1892-1913/1914	23	666	75	0,11	-0,24	179 (27)	28	0,16	-0,032	493 (73)	47	0,10	-0,20
1914/1915-1929/1930	16	699	99	0,13	0,14	205 (29)	39	0,19	0,49	474 (68)	49	0,10	-0,27
1930/1931-1945/1946	16	628	64	0,10	0,06	160 (25)	25	0,16	0,64	499 (79)	36	0,07	-0,18
1946/1947-1977/1978	32	646	72	0,11	-0,10	185 (29)	27	0,15	0,14	469 (73)	48	0,10	-0,11
1978/1979-2001/2002	24	696	85	0,12	-0,11	210 (30)	29	0,14	0,19	463 (67)	52	0,11	-0,16
2002/2003-2020/2021	19	662	61	0,10	0,12	191 (29)	21	0,11	0,10	472 (71)	33	0,07	-0,12
б) ряды (естественные), различающиеся типом атмосферной циркуляции [133]													
1891/1892-1928/1929 (W)	38	679	82	0,12	0,02	190	35	0,18	0,27	485	49	0,10	-0,29
1929/1930-1939/1940 (E)	11	616	58	0,09	0,003	157	30	0,19	0,37	496	42	0,08	-0,16
1940/1941-1948/1949 (C)	9	661	53	0,08	-0,57	190	30	0,16	0,20	471	35	0,07	0,10
1949/1950-1972/1973 (E+C)	24	644	68	0,11	0,08	186	23	0,12	0,06	467	35	0,07	0,13
1973/1974-1988/1989 (W+E)	16	682	86	0,13	-0,03	196	33	0,17	0,37	476	62	0,13	-0,17
в) ряды (наблюдённый), соответствующие характерным периодам колебания уровня Каспийского моря													
1891/1892-1929/1930 (относит. стабильный уровень)	39	678	81	0,12	0,02	190	35	0,18	0,33	483	49	0,10	-0,27
1930/1931-1941/1942 (катастроф. снижение уровня)	12	620	71	0,12	0,03	153	24	0,16	0,60	504	36	0,07	-0,19
1942/1943-1969/1970 (замед. с.)	28	654	58	0,09	-0,09	175	23	0,13	-0,06	470	36	0,08	0,05
1978/1979-1988/1989 (под.уров.)	11	700	68	0,10	-0,65	193	22	0,11	-0,06	464	50	0,11	-0,28
1989/1990-2000/2001 (под.уров.)	12	692	104	0,15	0,05	203	32	0,16	0,03	463	57	0,12	-0,01

Примечание: для условий современного климата (базовый период – 1891/1892 – 2020/2021): норма атмосферных осадков составляет 665 мм/год; норма для условно-естественного стока – 189 мм (257 км³/год); норма суммарного испарения – 476 мм; норма наблюдаемого (фактического) стока – 182 мм/год (248 км³/год).

Для периода ускоренного подъема уровня моря (1978/1979 – 1988/1989 гг. и 1989/1990 – 2000/2001 гг.) имеют место повышенные осадки (700 и 692 мм/год) и увеличенная водность (193 мм/год (263 км³/год) и 203 мм/год (276 км³/год)) в бассейне р. Волги. Таким образом, совершенно очевидно, что длительные однонаправленные изменения уровня Каспийского моря во многом, если не в основном, обусловлены аномальным притоком волжской воды в рассматриваемых периодах, т.е. отклонение водности р. Волги от среднемноголетней нормы. Следовательно, нестационарности (или цикличности) свойственные ЭВБ р. Волги способствуют периодически повышению и понижению уровня Каспийского моря вокруг её уровня тяготения.

Рассмотрим период 1935/1936 – 2000/2001 гг., под влиянием антропогенного воздействия, начиная с 30-х годов XX века происходит увеличение испарения по сравнению с условно естественным испарением, достигающего максимальных значений к 80-м годам (22 мм/год).

В таблице 3.4 показаны средние значения антропогенно-измененного и условно естественного испарения. В дальнейшем в связи со спадом промышленного производства начинается период снижения испарения, на которое оказывается антропогенное воздействие. В связи с этими исследованиями можем прийти к выводу, что современный водный баланс в бассейне Волги формируется под воздействием климатических и природных факторов. При оценке величин его элементов как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе следует опираться на сценарии изменений климата. Масштабы воздействия антропогенной деятельности на сток Волги можно увидеть при сопоставлении интегральных кривых условно-естественного и наблюдаемого стока (рисунок 3.5). В течение последних 60 лет общий годовой сток Волги демонстрировал снижение, при этом интегральное уменьшение получилось около 18 км³/год, т.е. 8% от среднемноголетнего условно-естественного стока. Это подтверждает, что главную роль в формировании стока Волги играет климатическое и природное влияние.

Таблица 3.4 – Трансформация испарения в бассейне реки Волги в зоне ее формирования у города Волгограда в результате хозяйственной деятельности в ее бассейне. В числителе приведены данные автора, а в знаменателе – ИВП РАН [73].

Периоды	$E_{\text{УЕ}}$	$E_{\text{Х/Д}}$	$\Delta E = E_{\text{УЕ}} - E_{\text{Х/Д}}$
1935/1936 – 1944/1945	$\frac{462}{467}$	$\frac{465}{472}$	$\frac{3,0}{5,0}$
1945/1946 – 1954/1955	$\frac{469}{452}$	$\frac{482}{465}$	$\frac{13}{13}$
1955/1965 – 1964/1965	$\frac{476}{466}$	$\frac{492}{482}$	$\frac{16}{16}$
1965/1966 – 1974/1975	$\frac{437}{450}$	$\frac{455}{468}$	$\frac{18}{18}$
1975/1976 – 1984/1985	$\frac{480}{454}$	$\frac{502}{474}$	$\frac{22}{23}$
1985/1986 – 1994/1995	$\frac{504}{444}$	$\frac{514}{451}$	$\frac{10}{7}$
1995/1996 – 2000/2001	$\frac{460}{446}$	$\frac{465}{451}$	$\frac{5,0}{5,0}$
1935/1936 – 2000/2001	$\frac{470}{455}$	$\frac{483}{468}$	$\frac{13}{13}$

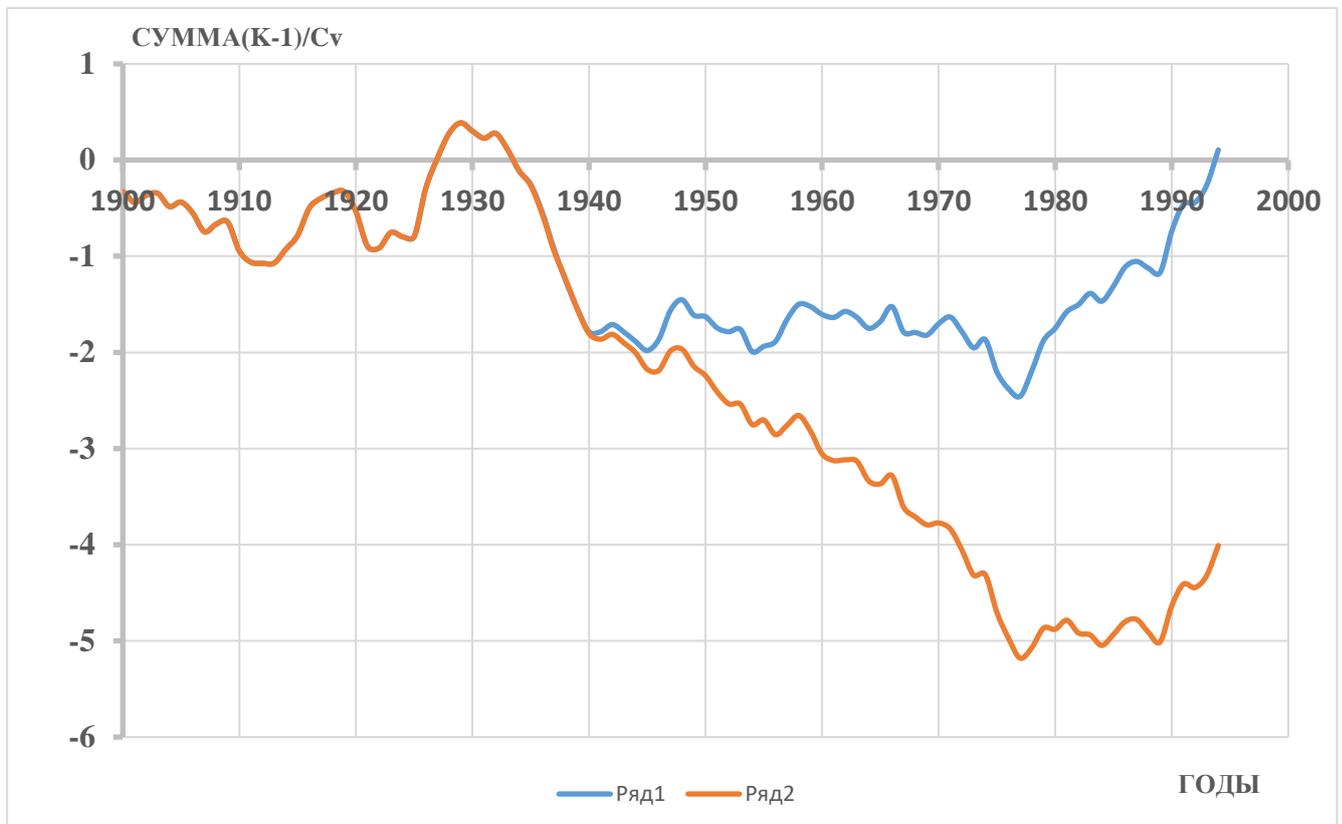


Рисунок 3.5 – Разностные интегральные кривые условно-естественного (ряд 1) и наблюдаемого (ряд 2) рядов годового стока бассейна р. Волги в зоне формирования до г. Волгограда (с. Дубовка).

3.2. Верификация уравнений связи годового и сезонного стока реки Волги от определяющих его природных (климатических) показателей

Длительные временные ряды ЭВБ, включая температуру приземного воздуха, позволили не только осуществить сравнительный ретроспективный анализ, но и выполнить верификацию уравнений связи годового и сезонного стока реки Волги от определяющих его природных (климатических) показателей. В связи с этим, прежде всего необходимо провести анализ и оценку наличия корреляционных связей ЭВБ и температуры приземного слоя с тем, чтобы выявить уровень связи исследуемых элементов водного баланса. Анализ показывает отсутствие корреляционных связей между общим испарением и температурой приземного воздуха (0,12), речным стоком и температурой приземного воздуха (-0,13). Причиной этого явления может быть сложная пространственная неоднородность изменений годовой температуры воздуха, а также ее значительная зависимость от времени года. Потепление наиболее заметно проявляется в холодный период года, тогда как в теплое время наблюдается незначительное снижение температуры (таблица 3.1). Для анализа изменения среднегодовой температуры воздуха применяются данные метеостанций, располагающие длительными рядами наблюдений. Эти станции, как правило, находятся в густонаселенных и промышленно развитых районах, где уровень хозяйственного освоения и урбанизации достигает 70-75%. В результате данные наблюдений на них не отражают изменение температуры воздуха тех ландшафтов, в пределах которых и формируется водный баланс речного бассейна. Кроме того, известно, что при расчетах суммарного испарения и испаряемости вместо температуры испаряющей поверхности используют температуру воздуха, измеренную на площадке метеостанции на высоте 2 м, т. е. вид подстилающей поверхности (вода, почва, растительность и др.) не учитываются. В результате различие температур воздуха и испаряющей поверхности связано с ошибками при вычислении суммарного испарения и, как следствие, речного стока. Исследование взаимосвязи между суммарным испарением, речным стоком и температурой испаряющей

поверхности показал выявило значительную корреляцию (со стоком – (-0,51), с суммарным испарением – 0,52) (таблица 3.8). Установлено, что связь между температурой испаряющей поверхности и температурой воздуха ничтожно мала (0,02) (таблица 3.8). Для оценки средней годовой температуры испаряющей поверхности (T_i^*) по известной величине температуры приземного воздуха (T_i) использовано уравнение из работы В.С. Мезенцева [137]:

$$T_i^* - T_i = -0,946T_i - 0,009P_{i-1} + 9,4, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.1)$$

для которой $R^2 = 0,70$.

Используя зависимость (3.1) и при наличии величины годовых температур приземного воздуха определили температуру испаряющей поверхности водосбора и в результате получили достаточно длительные временные ряды испаряющей поверхности водосбора за период 1901/1902 – 2020/2021 гг.

Для бассейна реки Волги в таблицах 3.5, 3.6 и 3.7 приведены коэффициенты парной корреляции между ЭВБ за половодье и межень (1914/1915 – 2020/2021 гг.) и для года (1901/1902 – 2020/2021 гг.). Наблюдается достаточно тесная взаимосвязь между следующими ЭВБ: 1. Между годовыми осадкам и стоком (0,62), и общим испарением (0,45), и бассейновыми влагозапасами (-0,91), и эффективными осадками (соответственно 0,92 и 0,81); 2. Между годовым речным стоком и суммарным испарением (-0,42), и бассейновыми влагозапасами (-0,89), и эффективными осадками (соответственно 0,27 и 0,97), и температурой испаряющей поверхности (-0,51); 3. Между годовым суммарным испарением и эффективными осадками (0,76), и температурой испаряющей поверхности (0,52); 4. Между атмосферными осадками периода половодья и речным стоком (0,47), бассейновыми влагозапасами (-1,0), эффективными осадками (соответственно 0,85 и 0,92); 5. Между речным стоком периода половодья и суммарным испарением (0,52), бассейновыми влагозапасами (-0,45), эффективным осадками (0,78); 6. Между суммарным испарением и эффективными осадками (0,41), и температурой холодного периода (0,31); 7. Между атмосферными осадками периода межени и речным стоком (0,42), бассейновыми влагозапасами (-0,81), эффективными

осадками (соответственно 0,85 и 0,74); 8. Между речным стоком периода межени и суммарным испарением (-0,71), и бассейновыми влагозапасами (-0,79), и эффективными осадками (0,88), температурой теплого периода (0,29) и холодного периода (0,30); 9. Между суммарным испарением периода межени и эффективными осадками (0,55), температурой теплого периода (-0,30) и холодного периода (-0,49). Результаты анализа корреляционных матриц (таблицы 3.6, 3.7, 3.8) ЭВБ со всей очевидностью показывают существование взаимосвязи между годовым и сезонным стоком от определяющих его природных (климатических) показателей:

$$R = f(P - E) \quad (3.2)$$

$$R = f(P, E) \quad (3.3)$$

$$R = (P, E, T^*) \quad (3.4)$$

Для оценки притока речных вод бассейна Волги в зону формирования к Волгоградскому гидроузлу (г/у) кроме уравнений (3.2) – (3.4), также исследованы уравнения вида

$$\Delta R = f[\Delta(P - E)] \quad (3.5)$$

$$\Delta R = f(\Delta P, \Delta E) \quad (3.6)$$

$$\Delta R = f(\Delta P, \Delta E, \Delta T^*) \quad (3.7)$$

Уравнения (3.5) – (3.7) содержат в себе данные о ежегодных отклонениях ЭВБ от их среднемноголетних значений, которые являются их ежегодными отклонениями от нормы. В результате можно сделать вывод, что расчетные значения стока можно представить в виде

$$R_i = R_{cp} + \Delta R_i \quad (3.8)$$

Используя результаты проведенного нами сравнительного ретроспективного анализа для всего бассейна р. Волги в зоне формирования, а также установленной взаимосвязи между парной корреляцией ЭВБ (таблицы 3.5, 3.6, 3.7) получены уравнения, которые связывают речной сток с климатическими факторами. В результате получены следующие уравнения:

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

$$RG = 0,300PG - 0,538EG + 244,31, \quad R = 0,93; R^2 = 0,87 \quad (3.9)$$

$$RG = 0,347(PG - EG) + 124,16, \quad R = 0,88; R^2 = 0,77 \quad (3.10)$$

$$RG = 0,209PG - 25,502TT^* + 144,27, \quad R = 0,76; R^2 = 0,58 \quad (3.11)$$

$$RG = 0,285PG - 0,471EG - 8,489TT^* + 253,62, \quad R = 0,94; R^2 = 0,89 \quad (3.12)$$

Половодье

$$RB = 0,186PB - 1,0571EB + 173,74, \quad R = 1,0; R^2 = 1,0 \quad (3.13)$$

$$RB = 0,35931(PB - EB) + 56,38, \quad R = 0,88; R^2 = 0,78 \quad (3.14)$$

Межень

$$RM = 0,2331PM - 0,4006EM + 139,66, \quad R = 0,94; R^2 = 0,89 \quad (3.15)$$

$$RM = 0,24225(PM - EM) + 56,38, \quad R = 0,88; R^2 = 0,78 \quad (3.16)$$

$$RM = 0,2332PM - 0,4008EM - 0,0314TT + 140,09, \quad R = 0,94; R^2 = 0,89 \quad (3.17)$$

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

$$RG = 0,4117PG - 0,5889EG + 195,78, \quad R = 1,0; R^2 = 1,0 \quad (3.18)$$

$$RG = 0,4313(PG - EG) + 107,68, \quad R = 0,96; R^2 = 0,93 \quad (3.19)$$

$$RG = 0,4054(PG - EG) - 6,4378TT^* + 135,8, \quad R = 0,97; R^2 = 0,95 \quad (3.20)$$

$$RG = 0,2422PG - 21,5719TT^* + 106,0, \quad R = 0,79; R^2 = 0,62 \quad (3.21)$$

Таким образом, получены уравнения взаимосвязи притока речных вод (годового и сезонного) в зону формирования у Волгограда (R) от атмосферных осадков (P), суммарного испарения (E), эффективных осадков, т.е. разности (P-E) и температуры подстилающей поверхности (T^*) (3.9) – (3.21).

Таблица 3.5 – Матрица коэффициентов парной корреляции между ЭВБ в период половодья бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда (с. Дубовка), период 1914/1915 – 2020/2021 гг. (n=107 лет).

ЭВБ \ ЭВБ	РВ	РВ	ЕВ	$\pm\Delta V$	РВ-РВ	РВ-ЕВ	ТТ	ТХ
РВ	1,00	0,47	0,25	1,0	0,85	0,92	-0,05	-0,11
РВ	0,47	1,00	0,52	-0,45	-0,07	0,78	-0,14	-0,15
ЕВ	0,25	0,52	1,00	-0,24	-0,03	0,41	0,17	0,31
$\pm\Delta V$	1,0	-0,44	-0,24	1,00	-0,86	-0,91	0,04	0,10
РВ-РВ	0,85	-0,07	-0,03	-0,86	1,00	0,58	0,03	-0,03
РВ-ЕВ	0,92	0,77	0,41	-0,91	0,58	1,00	-0,10	-0,14
ТТ	-0,05	-0,14	0,17	0,04	0,03	-0,09	1,00	0,25
ТХ	-0,11	-0,15	0,31	0,10	-0,03	-0,14	0,25	1,00

Таблица 3.6 – Матрица коэффициентов парной корреляции между ЭВБ в период межени бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда (с. Дубовка), период 1914/1915 – 2020/2021 гг. (n=107 лет).

ЭВБ \ ЭВБ	РМ	РМ	ЕМ	$\pm\Delta V$	РМ-РМ	РМ-ЕМ	ТТ	ТХ
РМ	1,00	0,42	0,26	-0,81	0,85	0,74	0,05	-0,22
РМ	0,42	1,00	-0,71	-0,79	0,20	0,88	0,29	0,30
ЕМ	0,26	-0,71	1,00	0,12	0,55	-0,29	-0,30	-0,49
$\pm\Delta V$	-0,81	-0,79	0,12	1,00	-0,76	-0,99	-0,15	0,01
РМ-РМ	0,85	0,20	0,55	-0,76	1,00	0,64	-0,07	-0,33
РМ-ЕМ	0,74	0,88	-0,29	-0,99	0,64	1,00	0,19	0,08
ТТ	0,05	0,29	-0,30	-0,15	-0,07	0,19	1,00	0,25
ТХ	-0,22	0,30	-0,49	0,01	-0,33	0,08	0,25	1,00

Таблица 3.7 – Матрица коэффициентов парной корреляции между годовым ЭВБ бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда (с. Дубовка), период 1901/1902 – 2020/2021 гг. (n=120 лет).

ЭВБ \ ЭВБ	РГ	РГ	ЕГ	$\pm\Delta V$	РГ-РГ	РГ-ЕГ	TI^*	ТГ
РГ	1,00	0,62	0,45	-0,91	0,92	0,81	-0,06	0,01
РГ	0,62	1,00	-0,42	-0,89	0,27	0,97	-0,51	0,12
ЕГ	0,45	-0,42	1,00	-0,03	0,76	-0,17	0,52	-0,13
$\pm\Delta V$	-0,91	-0,89	-0,03	1,00	-0,67	-0,98	0,31	-0,07
РГ-РГ	0,92	0,27	0,76	-0,67	1,00	0,51	0,19	-0,05
РГ-ЕГ	0,81	0,97	-0,17	-0,98	0,51	1,00	-0,41	0,10
ТГ _{исп.}	-0,06	-0,51	0,52	0,31	0,19	-0,41	1,00	0,02
ТГ	0,01	0,12	-0,13	-0,07	-0,04	0,10	0,02	1,00

Примечание: РВ, РМ, РГ – атмосферные осадки половодья, межени и года; РВ, РМ, РГ – речной сток половодья, межени и года в целом; ЕВ, ЕМ, ЕГ – суммарное испарение половодья, межени и года в целом; ТТ, ТХ – температура теплого и холодного периода; РВ-РВ, РВ-ЕВ; РМ-РМ, РМ-ЕМ; РГ-РГ, РГ-ЕГ – эффективные осадки половодья, межени и года в целом; TI^* – средняя годовая температура испарения подстилающей поверхности, ТГ – средняя годовая температура воздуха.

Как видно из систем уравнений (3.9) – (3.21) коэффициенты множественной корреляции (R) для всех полученных уравнений связи изменяются от 0,76 до 1,0, а коэффициент детерминации (R^2) от 0,62 до 1,0. При этом, целесообразно сначала использовать уравнения (3.9), (3.12), (3.13), (3.15) и (3.17) – (3.20) но и другие виды уравнений связи (3.10), (3.11), (3.14), (3.16) и (3.21) имеют право на существование.

В таблицах 3.8 – 3.10 приведены результаты сопоставления статистических параметров расчетного и фактического (условно-естественного) притока речных вод в зоне формирования у Волгограда р. Волги. При этом исследованы два базовых периода, различающиеся продолжительностью периода наблюдений: 1) 1914/1915 – 2020/2021 гг. (n=107 лет), 2) 1901/1902 – 2020/2021 гг. (n=120 лет).

Таблица 3.8 – Результаты сопоставления расчетного и фактического (условно-естественного) притока речных вод в зоне формирования Волги у Волгограда, период 1914/1915 – 2020/2021 гг. (n=107 лет)

Статистические параметры	Год				
	Фактический сток	Ур-е (3.9)	Ур-е (3.10)	Ур-е (3.11)	Ур-е (3.12)
Среднее (R)	190	190	190	190	190
Стандарт (σ_R)	34	32	30	26	32
C_V	0,18	0,17	0,16	0,14	0,17
$r[1]$	0,46	0,49	0,40	0,52	0,54
R	-	0,93	0,88	0,76	0,94
R^2	-	0,87	0,77	0,58	0,89

Таблица 3.9 – Результаты сопоставления расчетного и фактического (условно-естественного) притока речных вод в зоне формирования Волги у Волгограда, период 1914/1915 – 2020/2021 гг. (n=107 лет)

Параметры	Половодье			Межень			
	Реальный сток	Ур-е (3.13)	Ур-е (3.14)	Реальный сток	Ур-е (3.15)	Ур-е (3.16)	Ур-е (3.17)
Среднее (R)	116	116	116	74	74	74	74
Стандарт (σ_R)	24	24	19	21	20	18	20
C_V	0,21	0,21	0,16	0,28	0,27	0,24	0,27
$r[1]$	0,20	0,20	0,10	0,38	0,31	0,29	0,31
R	-	1,0	0,88	-	0,94	0,88	0,94
R^2	-	1,0	0,78	-	0,89	0,78	0,89

Таблица 3.10 – Результаты сопоставления расчетного и фактического (условно-естественного) притока речных вод в зоне формирования Волги у Волгограда, период 1901/1902 – 2020/2021 гг. (n=120 лет)

Статистические параметры	Год				
	Фактический сток	Ур-е (3.18)	Ур-е (3.19)	Ур-е (3.20)	Ур-е (3.21)
Среднее (R)	190	190	190	190	190
Стандарт (σ_R)	31	31	30	31	25
C_v	0,16	0,16	0,16	0,16	0,13
$r[1]$	0,43	0,43	0,40	0,46	0,51
R	-	1,0	0,96	0,97	0,79
R^2	-	1,0	0,93	0,95	0,62

Наряду с рассмотренными выше уравнениями, также нами были исследованы зависимости отклонения речного стока от нормы (ΔR), связанные с отклонением определяющих его климатических факторов от их нормы (3.5) – (3.7).

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

$$\Delta R_G = 0,1637 + 0,3004\Delta P_G - 0,5376\Delta E_G, \quad R = 0,93; \quad R^2 = 0,87 \quad (3.22)$$

$$\Delta R_G = 0,1228 + 0,2852\Delta P_G - 0,4708\Delta E_G - 8,4858\Delta T^*, \quad R = 0,94; \quad R^2 = 0,89 \quad (3.23)$$

Половодье

$$\Delta R_B = 0,1860\Delta P_B - 1,0571\Delta E_B, \quad R = 1,0; \quad R^2 = 1,0 \quad (3.24)$$

$$\Delta R_B = -0,1448 + 0,3393(\Delta P_B - \Delta E_B), \quad R = 0,78; \quad R^2 = 0,60 \quad (3.25)$$

Межень

$$\Delta R_M = 0,2868 + 0,2331\Delta P_M - 0,4006\Delta E_M, \quad R = 0,94; \quad R^2 = 0,89 \quad (3.26)$$

$$\Delta R_M = 0,311 + 0,2422(\Delta P_M - \Delta E_M), \quad R = 0,88; \quad R^2 = 0,78 \quad (3.27)$$

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

$$\Delta R_G = -0,3828 + 0,4117\Delta P_G - 0,5889\Delta E_G, \quad R = 1,0; \quad R^2 = 1,0 \quad (3.28)$$

$$\Delta R_G = -0,3727 + 0,4313(\Delta P_G - \Delta E_G), \quad R = 0,97; \quad R^2 = 0,94 \quad (3.29)$$

$$\Delta R_G = -0,3770 + 0,4054(\Delta P_G - \Delta E_G) - 6,4378\Delta T^*, \quad R = 0,97; \quad R^2 = 0,94 \quad (3.30)$$

ЭВБ показывают динамику изменения в половодье, межени и годе, а полученные уравнения взаимосвязи стока с определяющими его факторами помогают оценить сток Волги в годы различной водности.

3.3. Оценка стационарности (нестационарности) и однородности (неоднородности) элементов водного баланса бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда

Для оценки и прогноза суммарного притока бассейна р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда было проанализировано и установлено наличие тенденции (тренда), цикличности и однородности (неоднородности) в многолетних рядах годовых и сезонных значений осадков, речного стока и общего испарения данного бассейна. Нестационарность процесса проявляется в наличии трендов – неслучайных тенденций к систематическому увеличению или уменьшению значений ЭВБ или амплитуды колебаний относительно их среднего значения. Для выявления наличия тренда используются критерий Спирмена, критерий И.И. Поляка и коэффициент корреляции [40, 115, 120]. В качестве гипотезы принимается отсутствие статистически значимых трендов в колебаниях ЭВБ рассматриваемого бассейна, то есть признание стационарности этих колебаний. Альтернативная гипотеза заключается в наличии статистически значимых трендов средних годовых и сезонных ЭВБ и, следовательно, в нестационарности рассматриваемых элементов за исследуемый период.

Для оценки значимости линейного тренда в рассматриваемых ЭВБ воспользовались методом, основанным на использовании коэффициента корреляции, который учитывает взаимосвязь между значениями временного ряда (x_i) и их порядковыми номерами (i). Он вычисляется по следующей формуле:

$$r_{x,i} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{i})}{(n-1)\sigma_x\sigma_i} \quad (3.31)$$

где: x_i – значение ЭВБ; \bar{x} – среднемноголетнее значение ЭВБ; i – порядковый номер члена ряда; \bar{i} – среднеарифметическое значение порядковых номеров; σ_x, σ_i – среднеквадратические отклонения значений временного ряда ЭВБ и их порядковых номеров, n – длина ряда.

Если $r_{x,i} \leq 0,3$ – статистическая связь незначительная; $0,3 \leq r_{x,i} \leq 0,7$ – статистическая связь средняя; $r_{x,i} \geq 0,7$ – высокая степень статистической связи.

Далее определяем среднеквадратическое отклонение коэффициента корреляции:

$$\sigma_{r_{x,i}} = \frac{1 - r_{x,i}^2}{\sqrt{n - 1}} \quad (3.32)$$

Коэффициент достоверности вычисляется с использованием следующей формулы:

$$K_D = \frac{r_{x,i}}{\sigma_{r_{x,i}}} \quad (3.33)$$

В случае, когда $r_{x,i} \geq 2\sigma_{r_{x,i}}$ и $K_D \geq 2$, при 5%-ном уровне значимости критерия ($\alpha = 5\%$) коэффициент корреляции является достоверным, а линейный тренд исследуемых ЭВБ статистически значим и отличается от нуля.

В таблице 3.11 приведены результаты расчетов по установлению наличия тренда ЭВБ бассейна р. Волги в зоне формирования (до г. Волгограда). Результаты таблицы 3.11 показывают, что в динамике атмосферных осадков как в период половодья и межени, так и года в целом сколько-нибудь явные тенденции не проявляются и характер колебаний скорее свидетельствует о стационарности рядов осадков. Аналогичные условия стационарности обнаруживаются и в колебаниях бассейновых влагозапасов. Нестационарность проявляется в многолетних колебаниях величин стока половодья, межени и годового, а также общего испарения и температуры приземного слоя воздуха. Для стока и общего испарения межени периода получили значения двойной среднеквадратической ошибки корреляции равные 0,16 и 0,12 (при уровне значимости 5%), которые меньше коэффициентов корреляции, равных 0,46 и -0,63. В результате принимается альтернативная гипотеза о нестационарности стока и общего испарения межени периода реки Волги. С учетом данного факта наблюдаем, что в долгосрочных колебаниях таких водных элементов как речной сток и суммарное испарение есть статистически значимый линейный тренд и, следовательно, они не могут быть отнесены к стационарным, так как они отклоняются от нулевой гипотезы «белого шума».

Таблица 3.11 – Оценка значимости линейного тренда годовых и сезонных элементов водного баланса в зоне формирования бассейна Волги у Волгограда, период 1914/1915 – 2020/2021 гг. (n=107 лет)

ЭВБ	Уравнение тренда	Среднее, мм/год	Оценка тренда по коэффициенту корреляции и коэффициенту достоверности				Значимость тренда
			R	σ_R	$2\sigma_R$	$K_D \geq 2$	
Период весеннего половодья							
P_B	$P_B = -0,1084t + 331,82$	326	-0,07	0,10	0,20	0,7	Не значим
R_B	$R_B = -0,1357t + 123,09$	116	-0,20	0,08	0,16	2,5	Значим
E_B	$E_B = 0,109t + 106,3$	115	0,22	0,08	0,16	2,5	Значим
ΔV_B	$\Delta V_B = 0,082t - 102,41$	-98	0,07	0,10	0,20	0,7	Не значим
Период межени (летне-осенняя и зимняя)							
P_M	$P_M = -0,3255t + 350,54$	333	-0,17	0,10	0,20	1,7	Не значим
R_M	$R_M = 0,3121t + 57,475$	74	0,46	0,08	0,16	5,8	Значим
E_M	$E_M = -0,9199t + 406,55$	357	-0,63	0,06	0,12	10,5	Значим
ΔV_M	$\Delta V_M = -0,2002t + 11,07$	-	-0,11	0,10	0,20	1,1	Не значим
Год в целом							
P_G	$P_G = -0,4339t + 682,36$	659	-0,16	0,09	0,18	1,8	Не значим
R_G	$R_G = 0,1764t + 180,57$	190	0,18	0,08	0,16	2,2	Значим
E_G	$E_G = 0,8106t + 512,86$	469	-0,51	0,07	0,14	7,3	Значим
ΔV_G	$\Delta V_G = -0,2002t + 11,07$	-	-0,11	0,10	0,20	1,1	Не значим
$TГ, ^\circ C$	$TГ = 0,0157t + 2,6185$	3,6	0,38	0,09	0,18	3,1	Значим
$TХ, ^\circ C$	$TХ = 0,0245t - 9,756$	-8,3	0,32	0,09	0,18	3,6	Значим
$TТ, ^\circ C$	$TТ = 0,0094t + 11,457$	12,0	0,28	0,09	0,18	4,2	Значим

Примечание: R_G – годовой сток, R_B и R_M – сезонный сток (половодье и межень), P_G – годовые осадки, P_B и P_M – сезонные осадки (половодье и межень), E_G – годовое суммарное испарение, E_B и E_M – сезонное испарение (половодье и межень), $\pm \Delta V_G$ – изменение влагозапасов за год, $\pm \Delta V_B$ и $\pm \Delta V_M$ – сезонное изменение бассейновых влагозапасов (половодье и межень), $TГ$ – годовая температура приземного слоя ($^\circ C$), $TХ$ – температура приземного воздуха холодного периода, $TТ$ – температура приземного воздуха теплого периода.

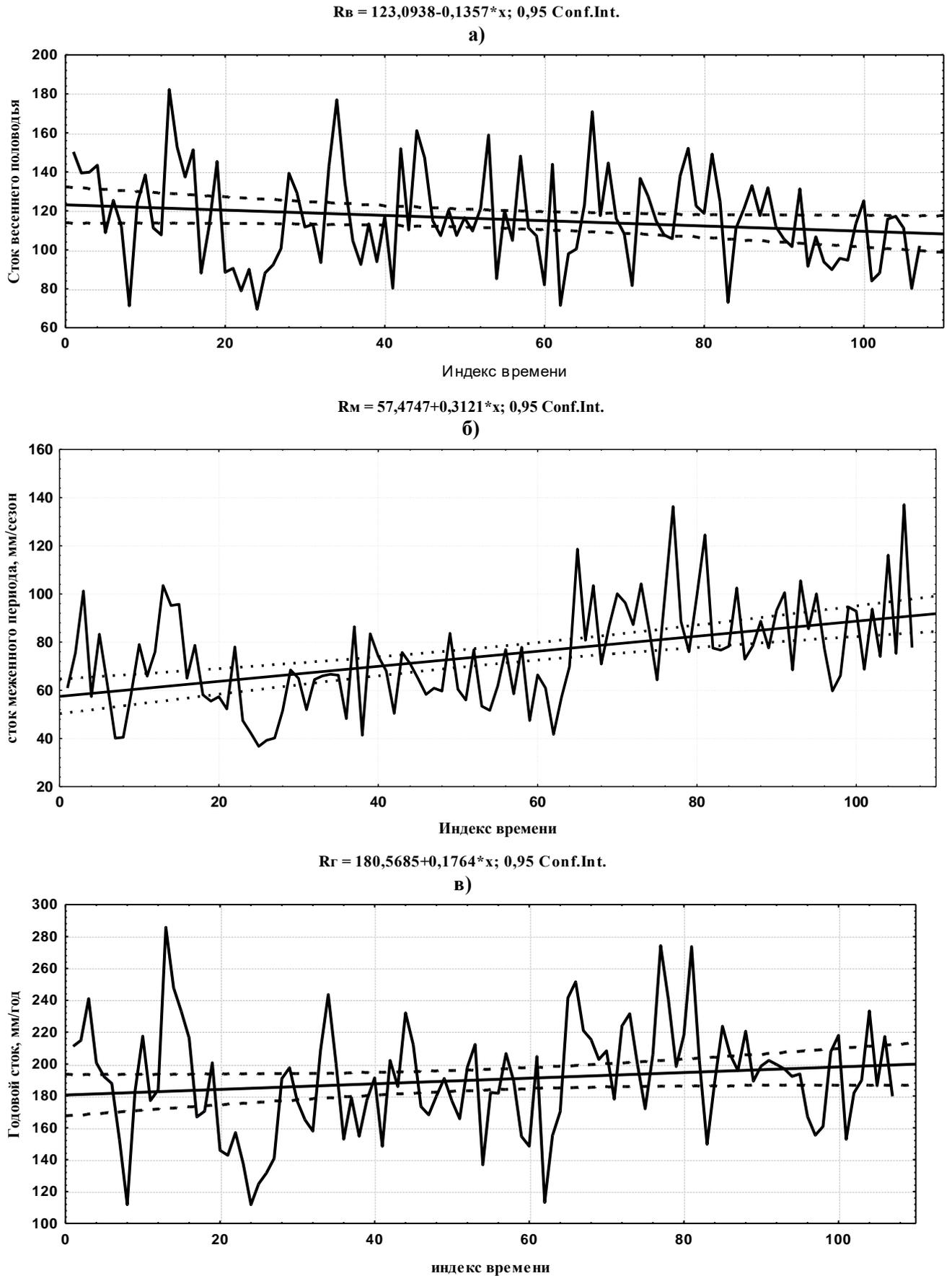


Рисунок 3.6 – График колебания стока Волги в зоне формирования у Волгограда за период 1914/1915-2020/2021 гг. с линейными трендами и 95% доверительными интервалами: а) период половодья; б) период межени; в) год в целом.

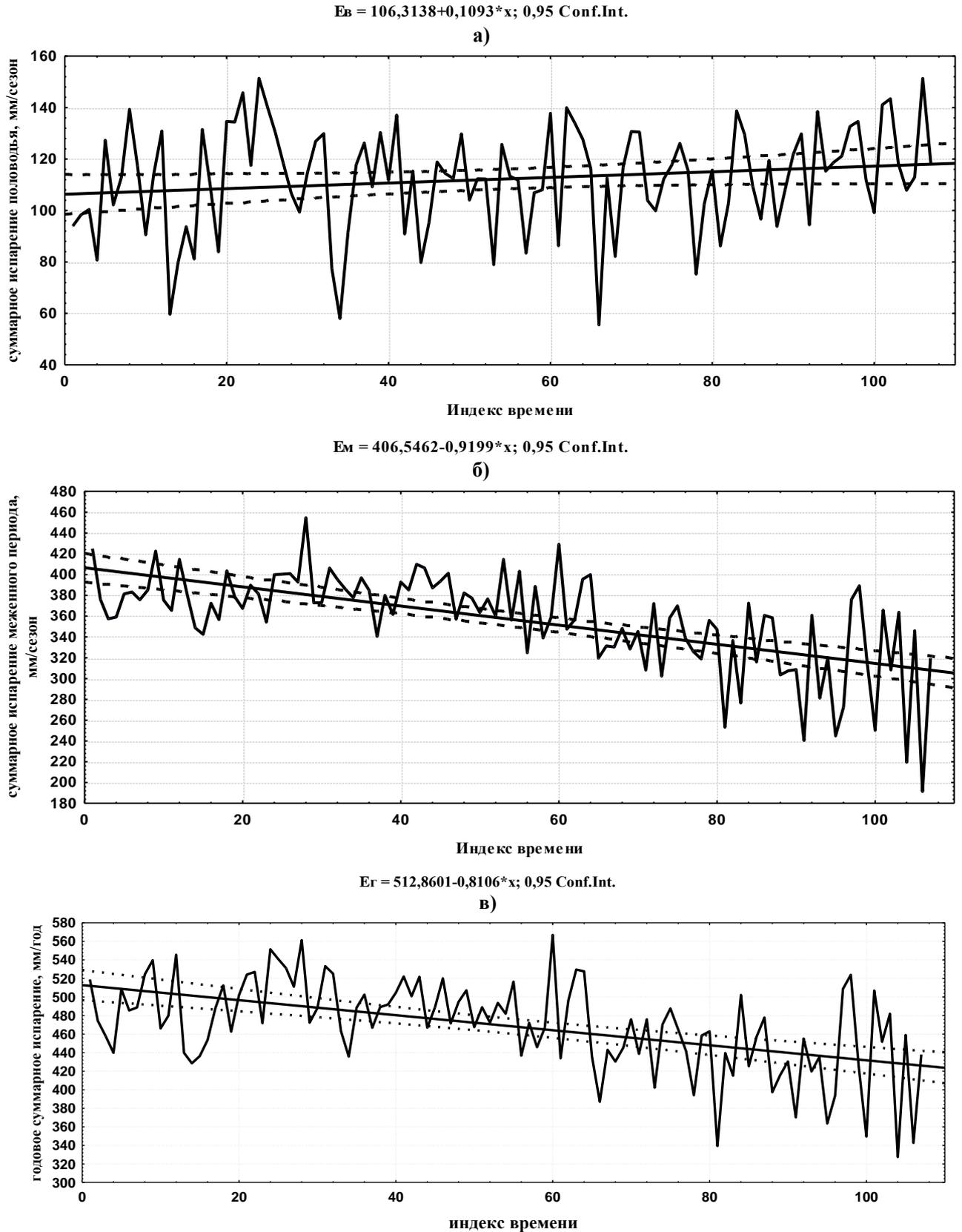


Рисунок 3.7 – График колебания суммарного испарения в бассейне Волги в зоне формирования у Волгограда за период 1914/1915 – 2020/2021 гг. с линейными трендами и 95% доверительными интервалами: а) период половодья; б) период межени; в) год в целом.

Исследование показало, что наиболее ярко выраженные тренды обнаруживаются в весеннем и меженном периоде и годе в целом в речном стоке и в суммарном испарении, учитывая среднюю температуру за год и в холодное время года. На рисунках 3.6 и 3.7 представлены многолетние колебания речного стока и суммарного испарения, а также приведены тренды и их доверительные интервалы с вероятностью 95%. Следует отметить, что доверительные интервалы представляют собой интервал значений вокруг оценки, где с 95% -ом уровнем доверия находятся «истинные» (неизвестные) средней генеральной совокупности.

Следующим шагом исследования нестационарности ЭВБ бассейна р. Волги является цикличность ЭВБ. 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 тенденций (тренды) в их динамике (таблица 3.12), однако рассмотрение разностных интегральных кривых атмосферных осадков (рисунок 3.8. а)) позволяет выделить характерные периоды в их колебаниях

$$\sum_{i=1}^{i=n} (K_i - 1) = f(T) \quad (3.34)$$

Как видно из рисунка 3.8 в многолетних колебаниях атмосферных осадков в рассматриваемый базовый период 1891/1892 – 2020/2021 гг. наблюдаются два полных достаточно длительных цикла, охватывающих 1911/1912 – 1940/1941 гг. (n=30 лет) и 1960/1961 – 1990/1991 гг. (n=30лет). При этом в колебаниях годовых атмосферных осадков выделяются два периода, в течение которых атмосферные осадки были ниже их базовых среднемноголетних величин (665 мм/год). Первый из этих периодов охватывает 21 год (1891/1892 – 1911/1912 гг.) со средними атмосферными осадками 660 мм/год. Второй продолжался достаточно длительный период с 1929/1930 – по 1975/1976 гг. (n=47 лет) со средними атмосферными осадками 638 мм/год (на 4,1% меньше базовых среднемноголетних). Внутри этого периода имел место период 1929/1930 – 1940/1941 гг. (12 лет) со сниженными осадками (среднее 611 мм/год на 8,1% меньше базисных среднемноголетних).

Также видим периоды с повышенными атмосферными осадками: 1912/1913 – 1928/1929 гг. (n=17 лет) и 1976/1977 – 1990/1991 гг. (n=15 лет). Средние атмосферные осадки первого из них составляют 701 мм/год (выше базового на 5,4%) и второго – 717 мм/год (выше базового на 7,8%). Начиная с 1991/1992 по 2020/2021 гг. (n=30 лет) происходит колебание осадков около базового среднемноголетнего, которое составляет 664 мм/год за этот период. Здесь выделяются два подпериода: 1991/1992 – 2006/2007 гг. (n=16 лет) и 2007/2008 – 2020/2021 гг. (n=14 лет). Средние значения атмосферных осадков первого периода составляют 662 мм/год (на 0,04% ниже базовых среднемноголетних), а второго – 667 мм/год (на 0,04% выше базовых среднемноголетних). При исследовании атмосферных осадков холодного и теплого периодов установлено, что существует достаточно явная сопряженность атмосферных осадков холодного периода с годовыми атмосферными осадками, что позволяет сделать вывод, что в формировании годового стока бассейна р. Волги большую роль играют атмосферные осадки холодного периода.

Более ясное представление о колебаниях речного стока, включая периоды с повышенной и пониженной водностью, а также их продолжительность, можно получить с помощью разностной интегральной кривой. Разностная интегральная кривая естественного годового стока бассейна Волги представлена на рисунке 3.8 б). При ее исследовании в пределах рассматриваемого 130-летнего периода можно выделить два полных цикла колебаний водности, включающих многоводную и маловодную ветви. Первый цикл колебания водности с 1891/1892 по 1929/1930 гг., общей длительностью 39 лет и второй – с 1930/1931 по 2004/2005 гг., длительностью 75 лет. В 2005/2006 году по всей видимости, начался третий цикл. Обращает на себя внимание прежде всего разная продолжительность циклов (39 и 74 года). Отклонение водности отдельных фаз от базового среднемноголетнего незначительно. Если в первом цикле сток многоводной его фазы превышал базовый среднемноголетний на 7,4%, то во втором цикле – 10,6%. Сток маловодной фазы первого цикла был на 5,3% ниже базового среднемноголетнего, а во втором цикле – 6,3%.

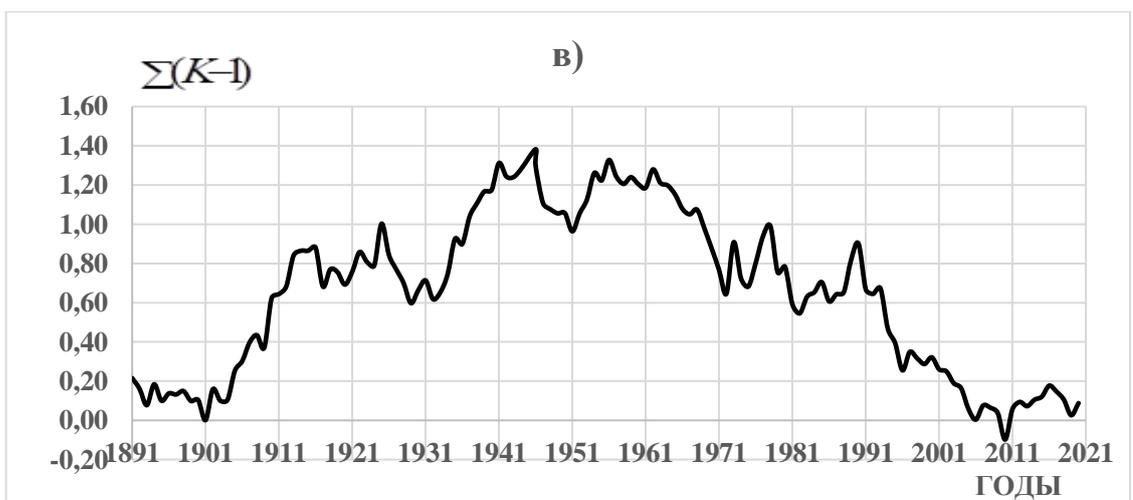
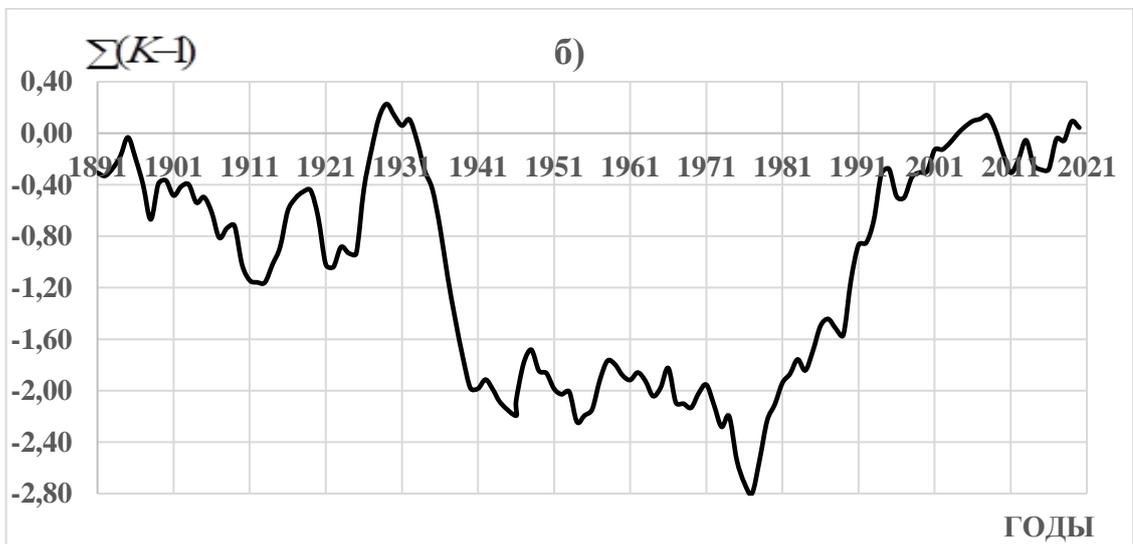
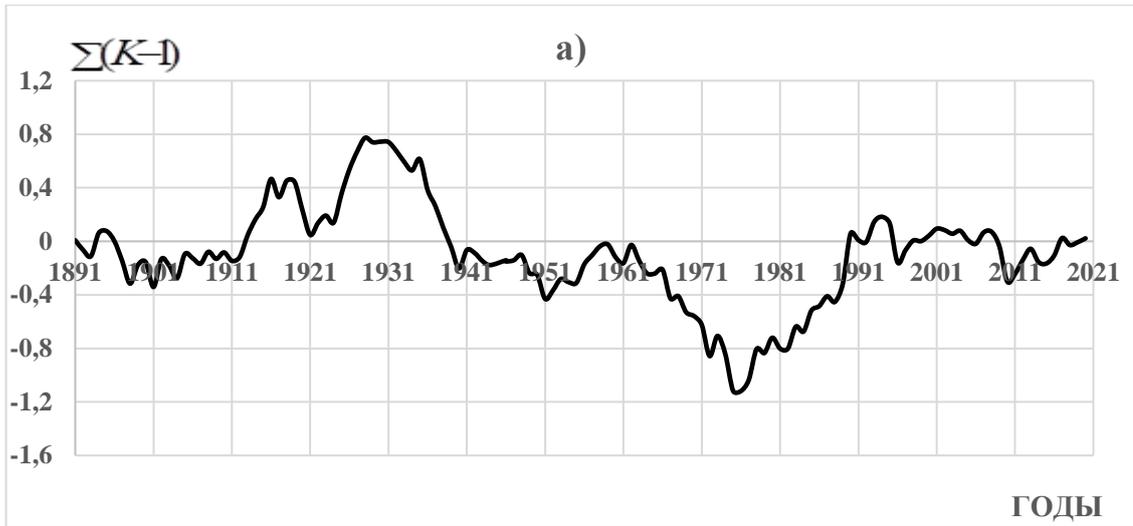


Рисунок 3.8 – Разностные интегральные кривые ЭВБ бассейна Волги за период 1891/1892 – 2020/2021 гг. (мм/год): а) атмосферные осадки; б) речной сток; в) суммарное испарение с поверхности суши

В то же время заслуживает внимания тот факт, что в обоих циклах масштабы изменения водности по фазам цикла соизмеримы: 7,4 и 5,3% в первом цикле и 10,6 и 6,3% – во втором. Кроме того, как видно из рисунка 3.8 б) в многолетнем колебании стока реки Волги обнаруживаются периоды различной водности. Так например, период с 1891/1892 по 1911/1912 гг. (n=21 год) характеризуется пониженной водностью со средним стоком 179 мм/год или 243 км³/год (на 5,3% ниже базовый среднемноголетних), а период с 1912/1913 по 1929/1930 гг. (n=18 лет) характеризуется повышенным стоком со средним стоком 203 мм/год или 276 км³/год (на 7,4% выше базовых среднемноголетних – 189 мм/год или 257 км³/год). В целом по водности период 1891/1892 – 1929/1930 гг. со средним стоком 190 мм/год или 258 км³/год близко к базовому среднемноголетнему стоку. Как видно из рисунка 3.8 б), выделяется достаточно продолжительный цикл, включающий в себя длительный маловодный период с 1930/1931 по 1977/1978 гг. (n=49 лет) со средним стоком 177 мм/год или 240 км³/год (на 6,6% меньше базовый среднемноголетних). Начиная с 1931 года и вплоть до 1978 года (период 1930/1931 – 1977/1978 гг.) в бассейне Волги наблюдалось небывалое маловодье. Со времени начала периода повышенной водности в период с 1978/1979 по 2004/2005 гг. (n=27 лет) на реках бассейна Волги вновь наступила фаза увеличенной водности, характеризующаяся средним стоком в 209 мм/год (284 км³/год, выше базового на 10,6%). С 2005/2006 по 2020/2021 гг. в бассейне Волги отмечается уменьшение средней водности до 190 мм/год (258 км³/год), т.е. рассматриваемый последний 16 лет средний сток волжского бассейна снизился до базового среднемноголетнего стока. Как видно из рисунка 3.8 на фоне выделенных циклов и периодов в многолетних колебаниях водности реки Волги за рассматриваемой 130-летний период (1891/1892 – 2020/2021 гг.) явно прослеживается общая тенденция снижения стока весеннего половодья, повышения стока меженного периода, особенно зимнего стока и в целом повышения годового стока. Этот факт позволяет полагать, что здесь возможно мы имеем дело с одним из длиннопериодических циклов изменения стока Волги. По-видимому, начавшийся третий цикл с 2005/2006 – 2020/2021 гг. сначала будет сопровождаться снижением притока речных вод в

зоне формирования, а затем его повышением. Если это действительно так, то можно выдвинуть гипотезу о том, что в 2005/2006 году началась ветвь спада этого длиннопериодного цикла в колебаниях стока реки Волги.

Аналогичный цикл выделяется при анализе суммарного испарения с поверхности суши водосборов бассейна Волги, оно демонстрирует динамику, которая отражает циклы речной воды. Фазы снижения речного стока совпадают с фазами увеличения суммарного испарения, в то время как фазы роста речного стока соответствуют фазам уменьшения суммарного испарения (рисунок 3.8 в)). Начиная с 1914/1915 по 1961/1962 гг. фиксируется рост суммарного испарения, а с 1962/1963 по 2011/2012 гг. происходит снижение данного ЭВБ, начиная с 2012/2013 года и до настоящего времени происходит повышение суммарного испарения. В динамике изменения бассейновых влагозапасов наблюдается этот же цикл. Сработка происходит при спаде осадков и речного стока, тогда как накопление происходит при возрастании осадков и речного стока. При этом накопление происходит в период половодья или паводков, а сработка в период межени и в результате невязка годового баланса уменьшается и в идеале стремится к нулю.

В целом, анализ разностных интегральных кривых ЭВБ бассейна р. Волги свидетельствует, что снижение атмосферных осадков в начале и в середине XX века вызвало снижение притока речных вод к Волгоградскому гидроузлу и в целом уменьшению притока речных вод в Каспийское море. Последние обусловило продолжительное падение уровня моря, продолжавшееся с разной интенсивностью вплоть до конца 70-х годов. С конца 70-х годов, по всей вероятности, начался период, когда в бассейне р. Волги увеличиваются и превышают среднемноголетнее значение атмосферные осадки. При этом тенденция к увеличению атмосферных осадков отмечается как для теплого, так и для холодного периодов и, конечно же, в целом для года. Это в свою очередь привело к увеличению притока речных вод в море. Связь изменений уровня Каспийского моря проявляется через взаимосвязь притока речных вод в море.

Существует несколько основных допущений, которые при прогнозировании ЭВБ речного бассейна необходимо выполнить, такие как однородность

(неоднородность) колебания ЭВБ, которые происходили в течение длительного периода времени.

По мере увеличения масштаба использования водных ресурсов в промышленности, в сельском хозяйстве, растущим населением планеты и в целом ростом экономики возросло воздействие на формирование ЭВБ, и у исследователей стали возникать сомнения, что можно согласиться с утверждением о стационарности процессов гидрологического цикла и климата. При рассмотрении температурного режима воздуха в бассейне реки Волги (таблица 3.1) установлено, что приращение температуры приземного слоя воздуха за 1976/1977 – 2020/2021 гг. по сравнению с предыдущим периодом 1901/1902 – 1975/1976 гг. составляет больше на 1.0°C (или 31%). А в холодный период наблюдалось потепление на $-1,7^{\circ}\text{C}$ (или 20%). В связи с этим представляет определенный научный интерес установление, насколько однородны базовые временные ряды ЭВБ бассейна р. Волги за два следующих периода 1914/1915 – 1975/1976 гг. и 1976/1977 – 2020/2021 гг. В связи с этим была предпринята оценка изменения среднемноголетнего значения (нормы) и дисперсии этих ЭВБ за выделенные периоды. Оценка изменения ЭВБ осуществлялась с помощью статистических критериев Стьюдента и Фишера [120]. Значения, полученные при исследовании однородности (неоднородности) средних показателей и дисперсии рядов сезонных и годовых ЭВБ бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда за период 1914/1915 – 2020/2021 гг. показаны в таблице 3.12. В результате расчета установлено следующее: выявлена неоднородность среднемноголетнего значения для годового стока, общего испарения и трансформации бассейновых влагозапасов. Среднемноголетние показатели годовых объемов атмосферных осадков оказались однородными. В каждом из случаев расчетные значения t-критерия Стьюдента превысили его критические значения ($3,23 > 1,66$; $6,54 > 1,66$; $2,96 > 1,66$ при уровне значимости критерия $\alpha = 5\%$). Таким образом, среднемноголетние значения годового стока, суммарного испарения и трансформации бассейновых влагозапасов неоднородны. В отличие от годовых значений некоторая пестрая картина наблюдается в период весеннего половодья и межени. Все

среднегодовое значения ЭВБ в период половодья оказались однородными. Оказались также однородными атмосферные осадки для межени периода, а такие составляющие как среднегодовое значение стока, общее испарение и трансформация бассейновых влагозапасов для межени периода оказались неоднородными. Применительно к дисперсиям всех рассмотренных ЭВБ получено, что для выделенных периодов свойственна однородность дисперсий за исключением речного стока в период половодья и суммарного испарения в период межени и года в целом.

Таким образом, можно прийти к предварительному выводу, что колебаниям ЭВБ бассейна Волги в XX веке характерна неоднородность по их среднегодовому значению как по годовому стоку, общему испарению и трансформации бассейновых влагозапасов, так и по аналогичными составляющими ЭВБ в период межени, в то же время их дисперсии за прошлый XX век в отличие от среднегодового значения почти не изменились, т.е. оказались однородными.

Таблица 3.12 – Оценка однородности средних значений и дисперсий рядов годовых и сезонных ЭВБ бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда за период 1914/1915 – 2020/2021 гг. (n=107 лет)

ЭВБ	Периоды	Среднее, мм/год	Дисперсия, мм/год	Критерий Стьюдента			Критерий Фишера		
				t	t _α	Вывод	F	F _α	Вывод
Период весеннее половодье									
PB	1914/1915-1975/1976	324	2182	0,55	1,66	+	1,15	1,15	+
	1976/1977-2020/2021	329	1895						
RB	1914/1915-1975/1976	117	705	0,86	1,66	+	1,70	1,60	-
	1976/1977-2020/2021	113	415						
EB	1914/1915-1975/1976	110	450	1,18	1,66	+	1,27	1,60	+
	1976/1977-2020/2021	115	355						
±ΔVB	1914/1915-1975/1976	-96	1417	0,59	1,66	+	1,12	1,60	+
	1976/1977-2020/2021	-100	1267						
Период межень (летне-осенняя и зимняя)									
PM	1914/1915-1975/1976	335	3643	0,40	1,66	+	1,21	1,60	+
	1976/1977-2020/2021	330	3020						
RM	1914/1915-1975/1976	64	246	7,42	1,66	-	1,43	1,60	+
	1976/1977-2020/2021	89	351						
EM	1914/1915-1975/1976	381	593	8,26	1,66	-	3,74	1,60	-
	1976/1977-2020/2021	323	2220						
±ΔVM	1914/1915-1975/1976	14	3380	2,96	1,66	-	1,15	1,60	+
	1976/1977-2020/2021	-19	2931						
Год в целом									
PГ	1914/1915-1975/1976	659	6880	0,02	1,66	+	1,02	1,60	
	1976/1977-2020/2021	659	7013						
RГ	1914/1915-1975/1976	181	1228	3,23	1,66	-	1,45	1,60	
	1976/1977-2020/2021	202	846						
EГ	1914/1915-1975/1976	491	1136	6,54	1,66	-	2,22	1,60	
	1976/1977-2020/2021	438	2522						
±ΔVГ	1914/1915-1975/1976	14	3380	2,95	1,66	-	1,15	1,60	
	1976/1977-2020/2021	-19	2931						

Примечание: t - расчетное значение критерия Стьюдента, t_α - критическое значение t - критерия при уровне значимости 5%; F - расчетные значение критерии Фишера, F_α - критические значение F - критерия при уровне значимости 5%; «+» – однородность, «-» – неоднородность.

Выводы по третьей главе

1. Реализация предложенной во второй главе методики оценки ЭВБ речного бассейна позволила для речного бассейна Волги организовать два различной длительности многолетних ряда сезонных и годовых ЭВБ за период 1891/1892 – 2020/2021 гг. и 1914/1915 – 2020/2021 годов. Столь продолжительные временные ряды по основным ЭВБ бассейна р. Волги позволили осуществить

сравнительный ретроспективный анализ изменчивости этих элементов во времени и выявить свойственные им закономерности отдельных периодов XX века.

2. Изучение колебаний ЭВБ бассейна Волги показывает, что до 1935 года в динамике стока данного региона главными были такие факторы как уровень увлажнения территории, режим испарения и трансформация влагозапасов в почве-грунтах. Начиная с 1935 года, действия человека, связанные с хозяйственной деятельностью и особенно режимы работы Волжско-Камского каскада гидроузлов, оказали значительное влияние на изменение уровня воды в Волге. Однако антропогенные влияния не затрагивают формирование бокового притока, который контролируется 11 водохранилищами Волжско-Камского каскада. Поэтому нами в дальнейших исследованиях были использованы два условно – естественных (восстановленных) временных ряда бассейна р. Волги разной длительности.

3. Ретроспективный анализ изменения ЭВБ показывает, что среднемноголетними величинами годового стока и стока меженного периода свойственен возрастающий тренд, тогда как в период половодья обнаруживается тенденция к уменьшению. Причиной возрастания среднемноголетней величины годового стока и стока меженного периода является увеличение атмосферных осадков и повышение температуры приземного слоя воздуха, особенно зимой. Явные тенденции в динамике атмосферных осадков не проявляются. В динамике суммарного испарения обнаруживается снижение в период межени и года в целом и повышение в период весеннего половодья.

4. Анализ трансформации среднегодовой температуры приземного слоя воздуха бассейна р. Волги за период 1901/1902 – 2020/2021 гг. показал, что приращение составляет для года в целом – $1,9 \text{ }^{\circ}\text{C}/120 \text{ лет}$, для холодного периода – $(-2,9) \text{ }^{\circ}\text{C}/120 \text{ лет}$. При этом, обнаружены устойчивые тенденции (тренды) возрастания среднемноголетней величины температуры приземного слоя воздуха. Потепление наиболее ярко выражено в холодные полугодия, в то время как в теплое наблюдается незначительное похолодание. Установлено отсутствие коррелятивной связи между речным стоком, суммарным уровнем испарения и температурой приземного слоя воздуха $(-0,17)$ и $0,15$. Следствием этого является

пространственная неоднородность изменения сезонной и годовой температуры приземного слоя воздуха, которая объясняется сложной пространственной структурой и недоучётом влияния подстилающей поверхности, т.е. влиянием ландшафтов, в пределах которых и формируются ЭВБ бассейна. Исходя из этого была определена температура подстилающей поверхности, для чего были использованы известные эмпирические зависимости, приведенные в работе [137]. Анализ уровня связи между речным стоком и суммарным испарением с температурой испаряющей поверхности показал хорошую корреляционную связь, соответственно -0,51 и 0,52.

5. Анализ разностных интегральных кривых ЭВБ бассейна Волги позволил выделить характерные периоды в их многолетних колебаниях. В многолетних колебаниях годовых осадков выделяются два периода с осадками ниже среднемноголетних: 1891/1892 – 1911/1912 гг. (n=21 год) со средними атмосферными осадками 660 мм/год, 1929/1930 – 1975/1976 гг. (n=47 лет) со средними атмосферными осадками 638 мм/год. Одновременно выделяются и два периода повышенных осадков: 1912/1913 – 1928/1929 гг. (n=17 лет) со средними атмосферными осадками 701 мм/год и 1976/1977 – 1990/1991 гг. (n=15 лет) со средними атмосферными осадками 717 мм/год.

6. Анализ разностной интегральной кривой естественного годового стока бассейна Волги у Волгограда позволяет выделить два полных цикла колебаний водности, включающих многоводную и маловодную ветви: первый цикл с 1891/1892 по 1929/1930 гг. (n=39 лет) и второй – с 1930/1931 по 2004/2005 (n=75 лет). Начиная с 2005/2006 по 2020/2021 гг. в волжском бассейне наблюдается снижение средней водности до 190 мм/год или 258 км³/год, т.е. рассматриваемый последний 16 лет средний сток волжского бассейна снизился до базового среднемноголетнего стока. По-видимому, начавшийся третий цикл с 2005/2006 по 2020/2021 гг. в волжском бассейне в начале будет сопровождаться снижением притока речных вод в зоне формирования, а затем его повышением. Если это действительно так, то можно выдвинуть гипотезу о том, что с 2005/2006 года началась ветвь спада этого длиннопериодного цикла в колебаниях стока Волги.

ГЛАВА. 4. ПРОГНОЗ РЕЧНОГО СТОКА РЕКИ ВОЛГИ В ЗОНЕ ФОРМИРОВАНИЯ У ВОЛГОГРАДА В XXI ВЕКЕ

4.1. Оценка нестационарности в многолетних колебаниях речного стока

Задача количественного описания характера протекания гидрологических процессов является важной задачей в общей системе управления водопользованием. Гидрологические процессы относятся к разряду сложных природных процессов. Условия развития их определяются действием различных факторов. Детерминированная составляющая порождается действием геофизических и гелиофизических причин, которые приводят к разным климатическим и погодным условиям. В результате в гидрологических процессах проявляются существенные изменения, связанные с потеплением или похолоданием климата или периодические колебания (сезонные колебания). Случайная же составляющая формируется под действием различных факторов. В современных условиях описать в хронологическом порядке и тем более спрогнозировать результат совместного действия многих разнонаправленных факторов практически не представляется возможным. В силу этого кажущиеся беспорядочные флуктуации гидрологических элементов, в том числе многолетние колебания речного стока принято называть случайными колебаниями и для их описания применяются методы теории вероятностей и математической статистики [23, 66, 67, 104, 105, 132, 135, 144].

Сложившаяся практика гидрологических и водохозяйственных расчетов опирается на представления о стационарности стока и обуславливающих его гидрометеорологических процессах [104, 105, 123, 136, 139]. Разумеется, речь идет о квазистационарности – о допустимости гипотезы стационарности для периодов времени порядка столетия. Для решения проблемы управления с использованием водных ресурсов приходится ставить под сомнение весь комплекс представлений, связанных с гипотезой о стационарности режима природных вод. Это обусловлено изменением элементов водного баланса и режима речных вод, как вследствие

естественных флуктуаций гидрометеорологических условий под влиянием глобальных изменений климата, так и под воздействием антропогенных факторов. В 3 главе анализируются условия формирования стока реки Волги, что свидетельствует о необходимости детального изучения закономерностей динамики как климатических факторов, так и собственного стока Волги и учета всех факторов, которые влияют на сток Волги и его межгодовую изменчивость [73, 75, 78, 82, 85, 86].

Гидрологический цикл представляет собой завершённый процесс круговорота и перераспределения воды между атмосферой и сушей [26, 27, 30, 43, 63, 110, 122, 149]. Этот процесс непрерывно изменяет баланс между водами суши и атмосферы. Для каждого речного бассейна выполняется баланс массы между притоком воды и ее оттоком, суммарным испарением и изменением влагозапасов в пределах бассейна. В методическом плане нас интересует динамическая реакция расхода воды $X(t) = Q(t)$ (выходной сигнал) бассейна на стохастическую функцию осадки (входной сигнал) в некоторые моменты времени – $X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n)$. Суть моделирования притока речных вод заключается в том, что по имеющимся экспериментальным (наблюденным) данным определяются параметры и строится одномерная интегральная функция распределения случайной величины X

$$F(X) = \int_{\infty}^x f(x)dx \quad (4.1)$$

значения которой суть вероятности осуществления неравенства $X < x$, $f(x)$ – плотность вероятности.

В гидрологии распределение стока представляется кривой обеспеченности $P(x)$ [23, 71]. Связь ее ординат с обычно применяемой в теории вероятностей и математической статистике функцией распределения вероятностей такова

$$P(x) = 1 - F(X) = 1 - \int_{\infty}^x f(x)dx \quad (4.2)$$

т. е. $P(x)$ есть вероятность осуществления неравенства $X \geq x$, иначе называемая вероятностью превышения (обеспеченность).

Как видно из уравнений (4.1) и (4.2) приток речных вод к характерным створам речного бассейна является непрерывным стохастическим процессом [23, 104, 123, 132], однако для решения водохозяйственных задач его можно рассматривать как процесс Маркова с дискретным временем [23, 104, 105]. В начале учитывается наличие стохастической связи между стоком смежных лет, пренебрегая связью между стоком несмежных лет. Таким образом, колебания годовых величин стока здесь рассматриваются как простая цепь Маркова. Стохастическая связь между стоками смежных лет выражается функцией перехода $F(\frac{k_{i+1}}{k_i})$, управляющей марковским процессом, значения которой суть условные вероятностные распределения k_{i+1} при заданных значениях k_i (модульный коэффициент стока), которые описываются уравнением в виде

$$k_{i+1}(k_i) - \bar{k}_{i+1} = r \frac{\sigma_{k_{i+1}}}{\sigma_{k_i}} (k_i - \bar{k}_i) \quad (4.3)$$

где: $k_{i+1}(k_i)$ – условное математическое ожидание k_{i+1} при заданном k_i ; $\sigma_{k_{i+1}}$ и σ_{k_i} – безусловные стандарты (среднеквадратичные отклонения) годовых объемов стока; \bar{k}_{i+1} и \bar{k}_i – безусловные математические ожидания годовых объемов стока.

Поскольку рассматривается корреляция между стоком смежных лет, т.е. исследуются связи членов некоторого ряда с членами того же ряда, смещенного на один год, то очевидно, что $\sigma_{k_{i+1}} = \sigma_{k_i}$, $\bar{k}_{i+1} = \bar{k}_i = 1$, тогда зависимость (4.3) примет следующий вид

$$k_{i+1}(k_i) = 1 + r(k_i - 1) \quad (4.4)$$

Гидрологические процессы стали представляться многими исследователями как стохастические [93, 144, 157]. Однако подобный подход к их оценке не является вполне корректным. Гидрологические процессы – это природные процессы. Стохастическими же являются модели, применяемые для их описания [123]. Стохастические модели, как известно, подразумевают наличие у процесса бесчисленного множества реализаций и описываются бесконечным числом конечномерных распределений. Это не что иное, как математические абстракции. Природные же процессы всегда имеют одну единственную реализацию во времени. Возможность применения к их описанию стохастических моделей связана с использованием некоторого искусственного приема – представления одной и той же реализации в виде бесконечного множества реализаций, получаемых путем бесчисленных сдвижек этой одной реализации по оси времени [165]. Понятно, что такое описание носит условный характер. На вопрос, насколько оно полезно, может дать ответ только практика.

Вполне очевидно, что наилучшей формой отображения характера развития гидрологических процессов является форма хронологического их описания. С помощью такого приема оценки могут отображаться прежде всего периодические сезонные колебания гидрологических элементов, а также длительные направленные изменения гидрологических величин, выражающие тенденции или тренды в своем ходе и многолетние периодические колебания гидрологических характеристик. Для водохозяйственной практики такая форма отображения предшествующих и будущих условий является наиболее предпочтительной. Однако в реальных условиях обычно возникают значительные трудности с реализацией приема календарного описания хода гидрологических характеристик. Они связаны с проявлением флуктуационных колебаний, накладывающихся на направленные или периодические изменения гидрологических процессов. Вопросы о проявляющихся соотношениях между детерминированной и случайной составляющими в гидрологических процессах вообще является достаточно сложными. На небольших отрезках времени, исчисляемых десятками или даже сотнями лет, случайные колебания являются обычно преобладающими в отличие

от детерминированных. В результате в колебаниях гидрологических величин достаточно отчетливо начинают проявляться и вероятностные закономерности. Таким образом, вероятностное описание здесь выступает как инструмент для получения прогностических описаний будущих режимов развития гидрологических процессов.

Процесс развития гидрологического цикла можно рассмотреть, как модель, которая представляет зависимость параметров распределения значений от координат времени. В связи с этим, этот процесс приобретает динамико-стохастический вид [89, 110]. Детерминированная составляющая изменения элементов получает привязку ко времени, а стохастическая составляющая рассматривается как некоторое случайное отклонение элементов в каждый конкретный момент времени от их математического ожидания. Исходя из сказанного случайную k_{i+1} при известном и коррелятивно с ней связанном значении k_i , можно определить с помощью зависимости, выведенной С.Н. Крицким, М.Ф. Менкелем и в дальнейшем получившей развитие в работе Г.Г. Сванидзе [89, 144].

$$k_{i+1}(k_i) = 1 + r(k_i - 1) + \Phi_{i+1} C_v \sqrt{1 - r^2} \quad (4.5)$$

Величина Φ_{i+1} определяется по таблице Фостера-Рыбкина [131] в зависимости от условного коэффициента асимметрии C_s

$$C_{s_{усл.}}^{(i+1)} = \frac{2C_v \sqrt{1 - r^2}}{1 + r(k_i - 1)} \quad (4.6)$$

где: r – коэффициент корреляции между стоками смежных лет; C_v – коэффициент изменчивости.

От модульных коэффициентов переходим к абсолютным величинам среднегодового объема притока воды W_i (или к среднегодовым расходам воды Q_i) и формула (4.5) примет следующий вид

$$W_{i+1}(W_i) = \bar{W}_{i+1} + r(W_i - \bar{W}_i) + \Phi_{i+1} \sigma_w \sqrt{1 - r^2} \quad (4.7)$$

Как видно из уравнения (4.7) приток речных вод W_{i+1} зависит от двух составляющих: зависимой – $\bar{W}_{i+1} + r(W_i - \bar{W}_i)$ и случайной – $\Phi_{i+1}\sigma_W\sqrt{1-r^2}$

Приведение нестационарного гидрологического процесса $W(t)$ к стационарным условиям $U(t)$ может быть выполнено по формуле

$$U(t) = \frac{W(t) - m(t)}{\sigma(t)} \quad (4.8)$$

Из этого следует, что полученная функция $U(t)$ описывает процесс с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, которая равна единице. Таким образом, этот процесс характеризуется как процесс с постоянными во времени критериями. Следовательно, является стационарным процессом. При описании данной функции можно перейти от календарного представления хода процесса к его вероятностной характеристике, т.е. $U(t) \rightarrow U(p)$. Обратный переход к условиям, учитывающим временную изменчивость притока речных вод и их флуктуационную структуру, может быть осуществлен по выражению

$$W(t, p) = m(t) + U(p)\sigma(t) \quad (4.9)$$

В уравнении (4.9) второе слагаемое $U(p)\sigma(t)$ есть ничто иное, как отклонение величины притока речных вод $W(t)$ в каждый момент времени t от его среднемноголетней водности. Таким образом, уравнение (4.9) принимает вид

$$W(t, p) = m(t) + \Delta W(p) \quad (4.10)$$

Учет и вероятностная оценка нестационарного притока речных вод сводится к решению таких задач, как определение условий изменения во времени детерминированной составляющей $m(t)$ и установление характера колебаний случайной составляющей $\Delta W(p)$.

Для иллюстрации возможности использования описанного подхода для решения задач, направленных на учет нестационарности в развитии гидрологических процессов, рассмотрим пример вероятностной оценки годового стока Волги в зоне формирования у Волгограда (с. Дубовка). Наблюдения за водностью реки Волги на этом гидрологическом посту ведутся с 1881 г. Последнее

время на базе проведения воднобалансовых расчетов институтом АО «Гидропроект» было выполнено приведение наблюдаемого стока реки к естественным условиям (условно-естественный). Эти восстановленные данные и были использованы нами в наших исследованиях. Согласно имеющимся данным, были оценены статистические параметры стока на основе многолетних рядов наблюдений различной продолжительности, а также проанализированы изменения этих параметров в зависимости от длительности и периодов. Результаты данных исследований изложены в работе [85]. По этим данным выделяются периоды, которые отличаются по водности: 1) период 1914/1915 – 1976/1977 гг. (n=63 год) со средним стоком 233 км³/год и 2) период 1977/1978 – 2013/2014 гг. (n=37 лет) со средним стоком 272 км³/год. По этим периодам построены хронологические графики и кривые обеспеченности изменения годовых объемов стока р. Волги у г. Волгограда. Как видно из рисунка 4.1 выделяются длительный маловодный период (n= 63 года) с 1914/1915 до 1976/1977 года и многоводный период (n=37 лет) с 1977/1978 до 2013/2014 года. Статистические параметры этих периодов различны (таблица 4.1 и рисунок 4.2). Выявленные отличия объясняются тем, что на формирование стока Волги определяющее влияние оказывают климатические факторы.

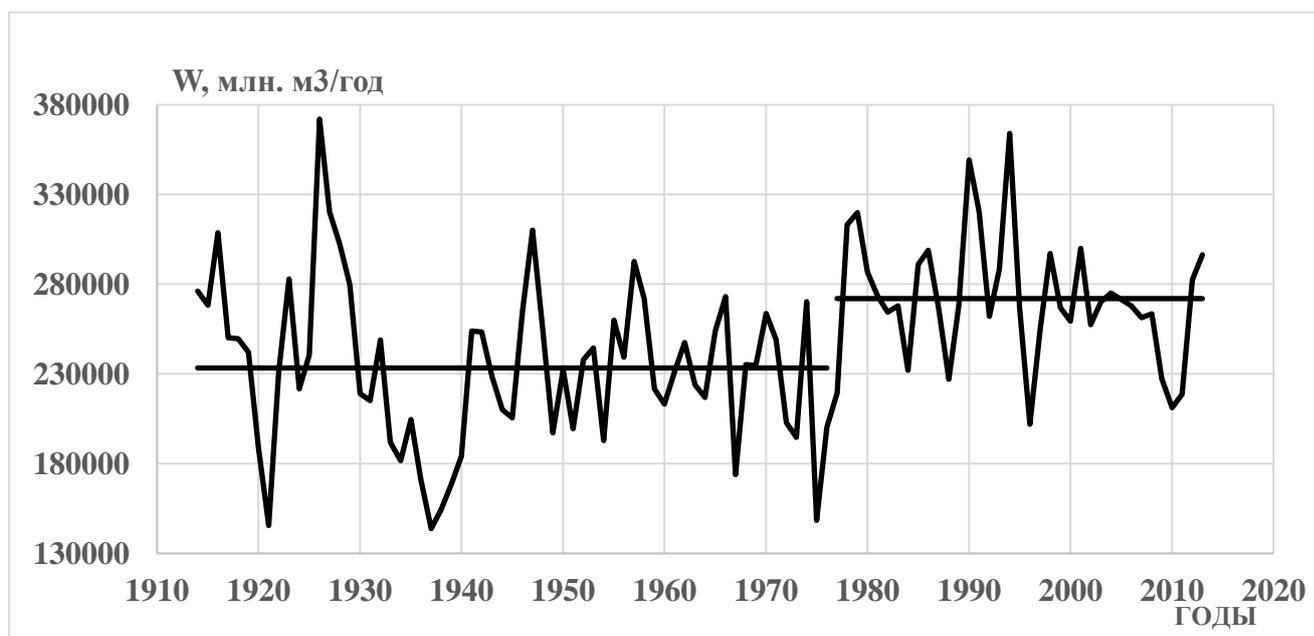


Рисунок 4.1 – Хронологический график изменения годовых объемов стока Волги за 1914/1915 – 2013/2014 гг.

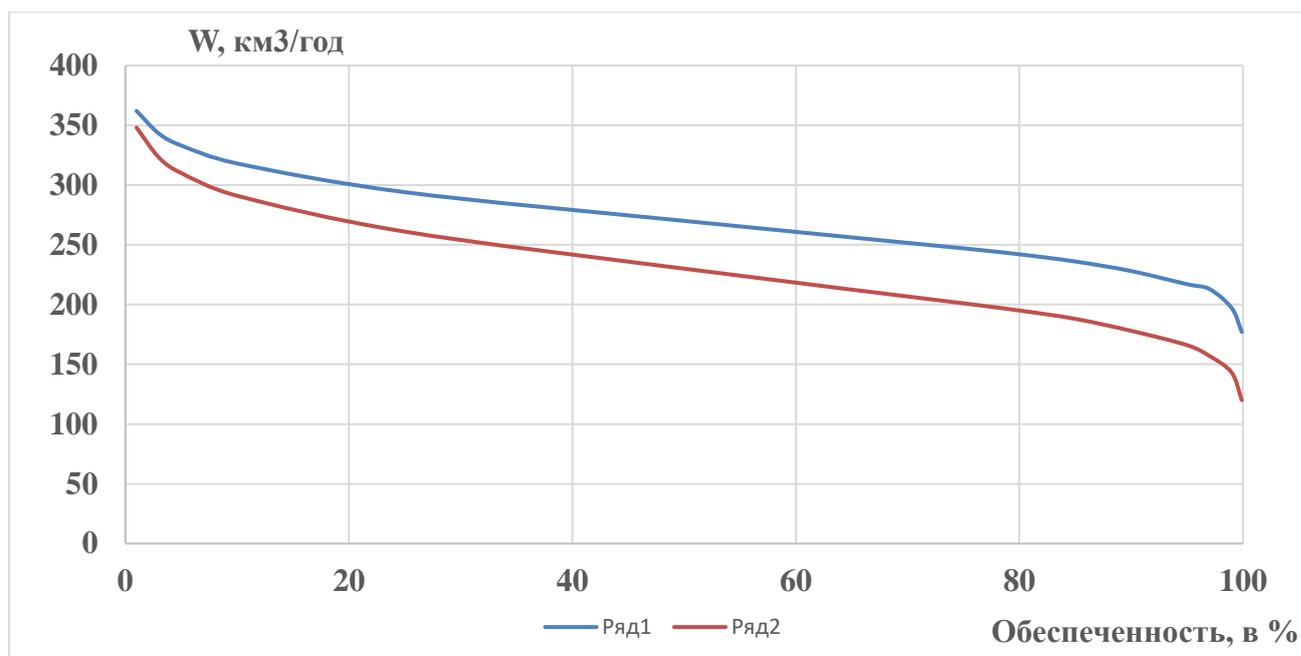


Рисунок 4.2 – Кривые обеспеченности годовых объемов стока Волги до Волгоградского гидроузла: ряд 1 – многоводный период; ряд 2 – маловодный период

Таблица 4.1 – Статистические параметры годового стока р. Волги у г. Волгограда в различные периоды наблюдений

Период наблюдений	Средний годовой сток, км ³ /год	Коэффициент вариации	Коэффициент асимметрии	Коэффициент автокорреляции
1914/1915 – 1976/1977	233	0,19	0,38	0,44
1977/1978 – 2013/2014	272	0,13	0,26	0,22

Далее материалы наблюдений за данные периоды были проверены на однородность. Проверка выполнялась на основе определения статистических критериев Фишера (для дисперсии) и Стьюдента (для среднего). Гипотеза однородности выборочных дисперсий по критерию Фишера показала, что при 5% уровне значимости данные по стоку Волги за указанные периоды однородны, так как статистика Фишера $F=1,30$ оказывается менее значимой по сравнению с критической ее величиной для рассматриваемого условия $F_{\alpha}=1,60$. Проверка по критерию Стьюдента выявила обратную картину. При 5% уровне значимости сравниваемые периоды по средним значениям неоднородны ($t=3,30$, $t_{\alpha}=1,66$). В таких условиях, объединение всех имеющихся материалов наблюдений за стоком

Волги у Волгограда в один ряд не может считаться корректным, и, поэтому, статистические решения, основанные на этих данных, не будут отличаться высокой устойчивостью. При данных условиях, для вероятностной оценки притока речных вод в характерных створах речного бассейна, можно применить вышеизложенный подход.

Для решения поставленной задачи, имеющуюся натурную информацию необходимо разбить на две группы, каждая из которых должна выполнять условия квазистационарности. Применительно к нашему примеру первая группа относится к маловодному периоду, который закончился в 1977 году, другая – к многоводному периоду, который начался с 1978 г. Для характеристики этих периодов строятся отдельные кривые обеспеченности годового стока (рисунок 4.2 и таблица 4.2). Анализируя таблицу 4.2 и рисунок 4.2 видим, что приведенные ординаты этих функций различаются. Расхождение в оценках, особенно в зоне больших обеспеченностей (таблица 4.2) достигают 48 км³/год (20 % при P=85 %) или 57 км³/год (32% при P=99,9 %). При реализации этой схемы расчетов возникает вопрос о возможностях распространения сферы действия этих функций на более длительный период на ближайшее время или в отдаленной перспективе. Решение этих вопросов требует выявления причинно-следственных связей в системе формирования развития гидрологических процессов и прогнозирования их тенденции развития в бассейне Волги. В связи с этим, предлагается использовать динамико-стохастическое уравнение (4.10). Как показал проведенный анализ, многолетние изменения водности р. Волги у г. Волгограда не вполне отвечают законам колебаний случайных величин. Отдельные параметры этого процесса (среднее значение) довольно существенно меняются во времени (таблица 4.1), другие характеристики (дисперсия, асимметричность распределения членов) наоборот, весьма мало изменяются в течении времени и практически могут считаться постоянными. Такое положение свидетельствует о том, что многолетний ход р. Волги как гидрологический процесс $W(t)$ включает в себя две составляющие – детерминированную и случайную. Присутствие детерминированной составляющей проявляется в изменении во времени среднего

значения водности $\bar{W}(t) = m(t)$, а присутствие случайной составляющей – в нерегулярных ежегодных отклонениях величин стока от среднего уровня водности $\Delta W(t)$. Последние могут оцениваться вероятностным способом, т. е. как $\Delta W(p)$. В первом приближении значения $\bar{W}(t) = m(t)$ для периода 1914/1915 – 1976/1977 гг. может быть принято равным 233 км³/год, а для периода 1977/1978 – 2013/2014 гг. и в дальнейшем до 2030 года равным 272 км³/год. Такие оценки получены из материалов фактических наблюдений (таблица 4.1) и экстраполируются эти тенденции на уровне 2030 года, таким образом, считается, что сохраняется тенденция повышения средней водности Волги, выявленная в периоде 1977/1978 – 2013/2014 гг. Следует отметить, что тенденция может иметь обратный ход, т.е. уменьшение средней водности в предстоящей перспективе. Такой подход требует рассмотрения различных вариантов изменения средней водности $\bar{W}(t) = m(t)$ притока речных вод бассейна р. Волги в ближайшей перспективе. Что касается случайных колебаний водности $\Delta W(p)$, то описание их характера в представляемом варианте может быть выполнено по имеющимся в нашем распоряжении восстановленным условно-естественным годовым объемам стока бассейна Волги у Волгограда за период 1914/1915 – 2013/2014 гг. Для оценки $\Delta W(p)$ используется выражение $\Delta W(p) = W(t) - \bar{W}(t)$ и получаем новый временной ряд организованный из отклонений величин притока речных вод от их среднего. По полученным таким образом рядам значений $\Delta W(t)$ составляем эмпирические кривые обеспеченности случайных колебаний годового стока р. Волги у г. Волгограда от среднего значения водности (рисунок 4.3) и затем аппроксимируем его плавной функцией обеспеченности отклонений. Такая операция выполнена и отдельные значения установленного распределения $\Delta W(p)$ помещены в таблице 4.3.

Имея описание условий изменения детерминированной и случайной составляющих развития гидрологических процессов в бассейне Волги, можно перейти к вероятностной оценке притока речных вод в створе Волгоградского г/у.

Таблица 4.2 – Оценки годового стока р. Волги у г. Волгограда различной обеспеченности для маловодного и многоводного периодов.

Обеспеченность, в %-ах	Годовой сток, км ³ /год		Расхождения в оценках	
	Маловодный период (1914/1915 – 1976/1977)	Многоводный период (1977/1978 – 2013/2014)	км ³ /год	в %-ах
1	348	362	14	4
3	323	343	20	6
5	310	333	23	7
10	291	318	27	8
25	261	294	33	11
50	230	270	40	15
75	201	247	46	19
80	195	242	47	19
85	188	236	48	20
90	178	228	50	22
95	166	217	51	23
97	157	213	56	26
99	143	197	54	27
99,9	120	177	57	32

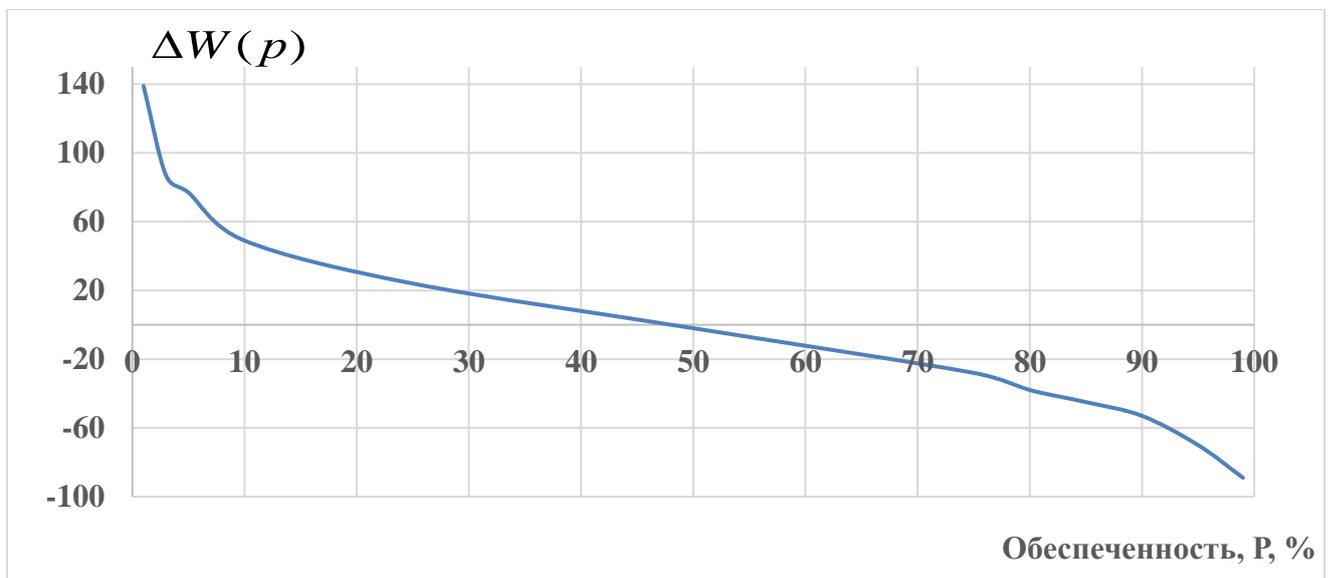


Рисунок 4.3 – Кривая обеспеченности отклонений годового стока р. Волги у Волгограда от среднего значения водности

Таблица 4.3 – Оценка случайных колебаний годового стока р. Волги у Волгограда от среднего значения водности.

Обеспеченность, %	Отклонение от среднего значения водности, км ³ /год
1	139
3	87
5	77
10	49
25	24
50	-2
75	-28
80	-38
85	-45
90	-53
95	-70
99	-89

Так, например, если в основе принять сохранение тенденции среднего значения притока речных вод р. Волги у г. Волгограда за период 1977/1978 – 2013/2014 гг. в объеме 272 км³/год, тогда на уровне 2030 года величина притока речных вод при 5% обеспеченности может составить $272+77=349$ км³/год, а при 95 % обеспеченности $272-70=202$ км³/год. Отметим, что оценка варианта многоводного периода дает достаточно близкие результаты, соответственно 333 (5 %) и 217 (7 %) км³/год. Таким образом, для учета и оценки нестационарности развития гидрологических процессов может использоваться метод, предложенный в данной работе.

4.2. Прогноз изменения среднемноголетнего стока р. Волги в зоне формирования на основе вероятностно-статистического подхода

Факт стохастической природы формирования речного стока определяет вероятностное описание его закономерностей развития в пространстве и времени. Эти закономерности окажут влияние на ближайшую и отдаленную перспективу. Правомерность принятия этой гипотезы подтверждается результатами исследований колебаний стока рек мира с наиболее длительными рядами наблюдений, выполненных в работе [176].

Оценка средних при вероятностном описании:

$$\bar{X}_{n+\tau} = \bar{X}_n \pm t_p K \sigma_{\bar{X}} \quad (4.11)$$

где \bar{X} – среднемноголетняя величина стока, n – длительность временного ряда, τ – заблаговременность прогноза, $\sigma_{\bar{X}}$ – среднеквадратическое отклонение прогнозируемой величины, t_p – критерий Стьюдента для уровня вероятности, K – поправочный коэффициент, уточняющий точность оценки заблаговременности прогноза [145].

Стандарт среднего определяется по формуле, полученной Семёновым С.М. в работе [145]

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma_X}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1+r[1]}{1-r[1]}} \quad (4.12)$$

где: σ_X – стандарт исходного ряда продолжительностью n лет.

Данные, представленные в таблице 4.4 показывают результаты средних многолетних значений ЭВБ Волги, определенных вероятностно-статистическим способом. При этом рассматриваются результаты оценки для заблаговременного прогноза $\tau = 10$ лет (2030 г.) и $\tau = 30$ лет (2050 г.), $t_{95\%} = 1,98$, $K = 1,02$, ($\tau = 10$) и $K = 1,03$ ($\tau = 30$) соответственно с рекомендациями работы Семёнова С.М. [145].

Таблица 4.4 – Вероятностно-статистическая оценка (норма ЭВБ) бассейна Волги для первой половины XXI века, мм/год

ЭВБ	Период		
	1891/1892 – 2020/2021	1891/1892 – 2030/2031	1891/1892 – 2050/2051
	$\bar{X}_n \pm t_p \sigma_{\bar{X}}$	$\bar{X}_n \pm t_p K \sigma_{\bar{X}}$	$\bar{X}_n \pm t_p K \sigma_{\bar{X}}$
Осадки \bar{P}	665 ± 14	$665 \pm 14,3$	$665 \pm 14,4$
Сток \bar{R}	$189 \pm 8,5$	$189 \pm 8,7$	$189 \pm 8,8$
Испарение \bar{E}	476 ± 8	$476 \pm 8,2$	$476 \pm 8,3$

Также, был рассмотрен способ прогноза развития речного стока Волги в зависимости средних 30-летних значений годового условно-естественного стока от среднего индекса 30-летки за период 1881/1882 – 2020/2021 гг. (n=140 лет). Результаты этой оценки приведены в таблице 4.5. При исследовании этого периода (рисунок 4.4) был выявлен тренд средних 30-летних значений годового стока, который является положительным:

$$R_{\text{cp}}^{(30)} = 0,1813i_{\text{cp}} + 235,68, \quad R^2 = 0,85 \quad (4.13)$$

где: $R_{\text{cp}}^{(30)}$ – средний 30-летний сток, i_{cp} – средний индекс 30-летки.

Существует вероятность того, что этот тренд сохранится и в начале XXI века. Таким образом, мы получим следующую последовательность оценки средних за следующие 10, 20 и 30 лет значений годового стока бассейна реки Волги. Примерно на уровне 2030 г. (10-летка) при $i_{\text{cp}} = 145,5$ норма стока составит 262 км³/год, который составляет 193 мм, рост стока Волги составит 5 км³/год по отношению к среднему стоку за период наблюдений (1881/1882 – 2020/2021 гг., $R_{\text{cp}} = 257$ км³/год), на уровне 2050 г. (20-летка) $i_{\text{cp}} = 160,5$ – 265 км³/год (195 мм/год), т. е. увеличится на 8 км³/год. При оценке 30-летки (2020/2021 – 2050/2051 гг.) $i_{\text{cp}} = 155$ среднемноголетний сток р. Волги составит 264 км³/год (194 мм/год) – увеличится на 7 км³/год. Отсюда можно прийти к выводу, что рост среднемноголетнего стока бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда к 2050 году будет незначительным и скорее всего, его показатели будут приближены к среднемноголетним значениям за базовый период наблюдений.

Предположим, что в качестве альтернативы такому значимому увеличению нормы стока реки Волги в начале XXI века обнаруженному положительному тренду придет на смену отрицательный тренд с аналогичным снижением стока (7 км³/год за 30 лет). Тогда, при достижении уровня 2050/2051 годов норма стока составит 250 км³/год (184 мм/год). Следовательно, в гидрологическом развитии происходят свойственные стоку циклические колебания – чередование фаз потепления и похолодания разной интенсивности.

Таблица 4.5 – Средний годовой сток за 30-летние интервалы реки Волги у Волгограда за период с 1881/1882 по 2020/2021 год (км³/год).

Средний сток за период 30 лет	Период 30 лет					1881/1882-2020/2021
	1881/1882 - 1910/1911	1911/1912- 1940/1941	1941/1942- 1970/1971	1971/1972- 2000/2001	2001/2002- 2020/2021	
$i_{\text{ср}}$	15,5	45,5	75,5	105,5	130,5	-
$R_{\text{ср}}^{(30)}$	250	233	238	264	261	257
$k_{\text{ср}}^{(30)}$	0,97	0,91	0,93	1,03	1,02	1,0

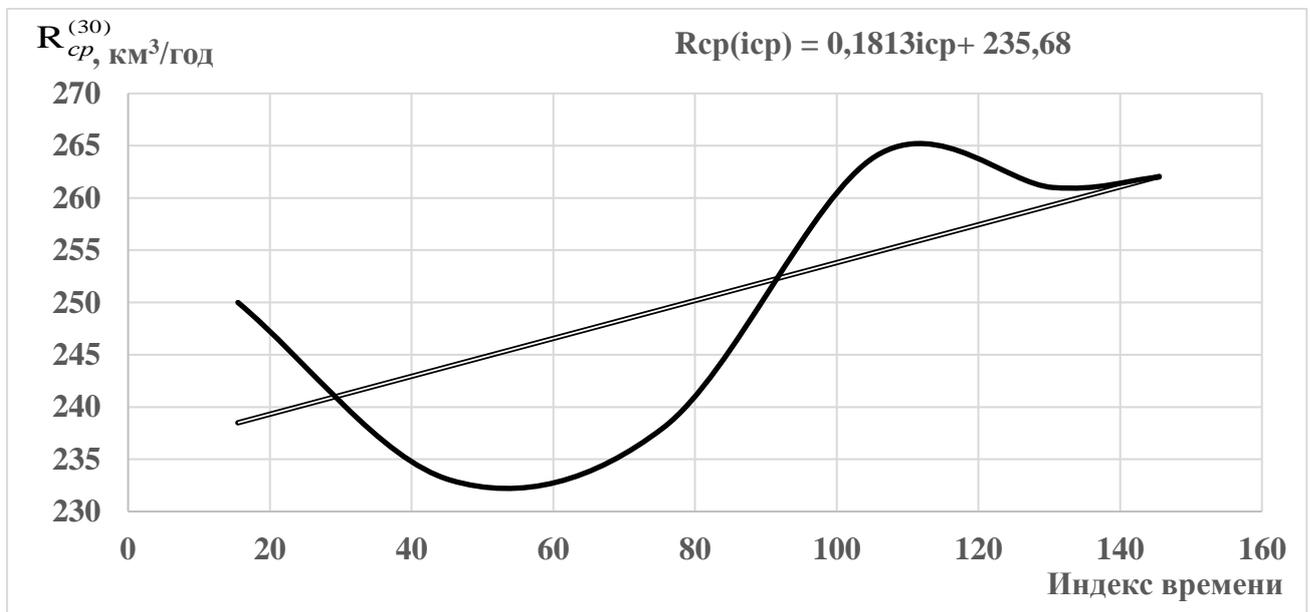


Рисунок 4.4 – Средние условно-естественные значения годового стока Волги за 30-летние интервалы от индекса времени.

4.3. Прогноз среднегодовалого стока р. Волги в зоне формирования на основе связи речного стока с климатическими показателями в соответствии со сценариями «МОЦАО»

В разделе (2.3) приведены результаты анализа сценариев возможного изменения климата и его влияния на речной сток. В частности, были исследованы потенциалы применения климатических сценариев будущего, рассмотренных в

третьем (СМIP3) и пятом (СМIP5) оценочных отчетах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, 2007) [21, 49, 94, 95, 97]. Полученные уравнения связи между стоком, осадками и общим испарением (раздел 3.2) были использованы для оценки изменения притока речных вод бассейна р. Волги до г. Волгограда на предстоящий период на отдельных этапах времени в XXI веке. Особенно это актуально в то время, когда имеются результаты современных разработок «МОЦАО» [21, 49, 94, 95, 97]. В данном разделе, используя уравнения связи стока от природных показателей (3.9), (3.12), (3.18) и (3.20) и моделей «МОЦАО» на основе специально разработанных сценариев для первой половины XXI века (таблицы 2.5 и 2.6) оценили изменения величины притока речных вод р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда до 2060 года. По данным таблицы 2.5 в сценарии SRES A2 (СМIP3) на уровне 2041 – 2060 гг. наблюдаются наибольшие изменения, при этом среднегодовая температура приземного слоя воздуха повышается на 2,2 градуса а атмосферные осадки возрастут на 25 мм/год по версии 1 относительно базового периода, а по версии 2 – соответственно 2,9°С и 62 мм/год. По сценарию RCP8.5 (СМIP5) на уровне 2041 – 2060 гг., версия 1 – среднегодовая температура приземного слоя воздуха повышается на 2,8 градуса, а осадки возрастут на 30 мм/год, по версии 2 – соответственно – 3,5°С и 58 мм/год.

С учетом данных таблицы 4.6 и 4.7, а также используя уравнения (3.9), (3.12) и (3.20), была проведена оценка притока стока бассейна Волги за 20 лет. В случае сценария A_2 результаты представлены в таблице 4.6 для периода 2011 – 2030 гг. средний речной сток показал рост на 5 – 14 мм/год (7 – 19 км³/год) относительно базового периода, который составляет 189 мм/год (257 км³/год). В период с 2031 по 2050 годы средняя температура воздуха за год может составить 4,8°С при 714 мм осадках и 469 мм общего испарении. Для сравнения, средний уровень речного стока за период оказался 190 – 206 мм/год или же 258 – 280 км³/год (рост на 1 – 17 мм/год или же 1,4 – 23 км³/год). По сценарию B_1 получили результаты близкие к сценарию A_2 (таблица 4.7).

Таблица 4.6 – Сравнение средних значений показателей за 20 лет стока речных вод в зоне формирования у Волгограда в середине первой половины XXI века для пяти моделей «МОЦАО» по варианту A_2 .

Параметры	Вариант A_2											
	Период 2011 – 2030 годов						Период 2031 – 2050 годов					
	Модели «МОЦАО»						Модели «МОЦАО»					
	1	2	3	4	5	Среднее	1	2	3	4	5	Среднее
$\bar{T}^{\circ}C$	4,6	4,9	4,6	4,9	3,9	4,6	5,7	6,1	5,5	5,6	4,0	5,5
\bar{P}	719	672	688	711	709	700	753	682	710	699	726	714
\bar{E}	474	462	466	472	468	468	470	472	472	466	464	469
R(3,9)	205	197	200	204	205	203	217	195	203	203	212	206
R(3,12)	196	186	191	192	202	194	198	174	187	186	208	190
R(3,20)	206	189	196	201	208	200	214	182	197	194	216	200

Таблица 4.7 – Сравнение средних значений показателей за 20 лет стока речных вод в зоне формирования у Волгограда в середине первой половины XXI века для пяти моделей «МОЦАО» по варианту B_1 .

Параметры	Вариант B_1											
	Период 2011 – 2030 годов						Период 2031 – 2050 годов					
	Модели «МОЦАО»						Модели «МОЦАО»					
	1	2	3	4	5	Среднее	1	2	3	4	5	Среднее
$\bar{T}^{\circ}C$	5,0	5,4	4,9	4,6	4,2	4,8	5,7	5,9	5,6	5,3	4,4	5,4
\bar{P}	744	671	721	678	721	707	754	684	732	691	717	716
\bar{E}	480	461	475	463	471	470	461	472	465	471	462	466
R(3,9)	209	198	205	199	207	204	222	196	214	198	211	208
R(3,12)	197	182	194	190	202	193	203	176	196	184	203	192
R(3,20)	211	186	204	193	210	201	218	184	208	191	211	202

Результаты исследований возможных изменений притока речных вод в зоне формирования у Волгограда в будущем с учетом МОЦАО, рассмотренных в третьем (СМIP3) оценочном докладе МГЭИК для вариантов (сценариев) SRES A2,

A1B и B1, для двух версий, различающихся по базовым периодам приведены в таблицах 4.8, 4.9 и 4.10. При этом рассматриваются модели трех сценариев: сценарий A2 – самый «жесткий», сценарий A1B – «промежуточный» и сценарий B1 – «мягкий» (раздел 2.3). Было проведено исследование изменения климата для начала первой половины XXI века (2011 – 2030 годы) и для середины первой половины XXI века (2041 – 2060 годы).

Используя среднемноголетние значения температуры (\bar{T}), осадков (\bar{P}), суммарного испарения (\bar{E}) определили норму притока речных вод бассейна р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда. При этом использованы полученные автором уравнения (3.9), (3.12), (3.18), (3.20) (раздел 3.2).

По сценарию SRES A2 (таблица 4.8) средний приток речных вод Волги в первой половине XXI века изменяется в пределах 190 – 203 мм/год (258 – 276 км³/год), рост на 1 – 14 мм/год (1,4 – 19 км³/год) – версия 1, при базовом значении притока 189 мм/год (257 км³/год). По версии 2 изменение среднего притока происходит в пределах 178 – 190 мм/год (242 – 258 км³/год), т. е по версии 2 возможен спад среднего притока на 11 мм/год (15 км³/год). По версии 1 до 2050 года средний приток речных вод может измениться как в сторону увеличения на 20 мм/год (27 км³/год), так и в сторону уменьшения на 8 мм/год (11 км³/год). В версии 2 изменения среднего притока происходит в пределах 161 – 188 мм/год (219 – 256 км³/год), т.е. средний приток бассейна р. Волги может уменьшиться на величину 28 мм/год (38 км³/год). Таким образом, в зависимости от используемых уравнений до 2030 года по сценарию SRES A2 (первая версия) норма стока бассейна р. Волги колеблется 190 мм/год (258 км³/год) – 203 мм/год (276 км³/год) в среднем по рассматриваемым уравнениям 196 мм/год (266 км³/год) (таблица 4.11), по версии 2 – от 178 – 190 мм/год (242 – 258 км³/год), а в среднем по уравнению 184 мм/год (250 км³/год). До 2050 года составляют: для версии 1 – 181 – 209 мм/год (246 – 284 км³/год) в среднем 195 мм/год (265 км³/год); для версии 2 – 161 – 188 мм/год (219 – 256 км³/год) в среднем 176 мм/год (239 км³/год). Как видно между версиями 1 и 2 имеются различия. Наблюдаемые различия между версиями 1 и 2 объясняются тем, что в сценариях SRES A2, A1B и B1 приняты разные базовые периоды. Так, для

версии 1 базовый период принят 1980 – 2000 гг., который включает в себя многоводный период, а версия 2 – 1914 – 2000 гг. включает в себя достаточно длительный маловодный период. Сравнивая результаты в таблице 4.11, видим, что на уровне 2030 года изменение среднемноголетнего притока в различных сценариях SRES A2, SRES A1B, SRES B1 незначительно отличаются. Если рассмотреть осредненные значения по сценариям и уравнениям по версии 1 составляют 195 мм/год (265 км³/год), по версии 2 – 184 мм/год (250 км³/год). Аналогичные результаты имеют место при рассмотрении на уровне 2050 года, по версии 1 – 196 мм (267 км³/год) и по версии 2 – 177 мм (241 км³/год). Следовательно, как показывают результаты анализа по сценариям SRES A2, SRES A1B, SRES B1 норма притока речных вод меняется в зависимости от версии, по версии 1 может увеличиться в начале первой половины XXI века на 6 мм/год (8 км³/год) и 7 мм/год (10 км³/год) в середине первой половины XXI век, по версии 2 может уменьшиться в начале первой половины XXI века на 5 мм/год (7 км³/год) и на 12 мм/год (16 км³/год) в середине первой половины XXI века.

Таблица 4.8 – Средние за 20-летие значения притока речных вод бассейна р. Волги до г. Волгограда по моделям для сценария SRES A2 (CMIP3) для двух версий с учетом осадков, испарения и температуры воздуха.

Версия	Сценарий SRES A2													
	Период 2011 – 2030 годов							Период 2041 – 2060 годов						
	$\bar{T}^{\circ}\text{C}$	\bar{P}	\bar{E}	R 3.9	R 3.12	R 3.18	R 3.20	$\bar{T}^{\circ}\text{C}$	\bar{P}	\bar{E}	R 3.9	R 3.12	R 3.18	R 3.20
1	4,26	687	475	195	190	203	194	5,79	705	477	199	181	209	191
2	4,43	692	499	183	178	190	186	6,03	715	520	179	161	188	176

Таблица 4.9 – Средние за 20-летие значения притока речных вод бассейна р. Волги до г. Волгограда по моделям для сценария SRES A1B (CMIP3) для двух версий с учетом осадков, испарения и температуры воздуха.

Версия	Сценарий SRES A1B													
	Период 2011 – 2030 годов							Период 2041 – 2060 годов						
	$\bar{T}^{\circ}\text{C}$	\bar{P}	\bar{E}	R 3.9	R 3.12	R 3.18	R 3.20	$\bar{T}^{\circ}\text{C}$	\bar{P}	\bar{E}	R 3.9	R 3.12	R 3.18	R 3.20
1	4,38	683	475	194	187	201	192	6,08	715	477	202	181	213	193
2	4,53	688	496	184	178	191	184	6,33	732	527	180	160	191	178

Таблица 4.10 – Средние за 20-летие значения притока речных вод бассейна р. Волги до г. Волгограда по моделям для сценария SRES B1 (CMIP3) для двух версий с учетом осадков, испарения и температуры воздуха.

Версия	Сценарий SRES B1													
	Период 2011 – 2030 годов							Период 2041 – 2060 годов						
	$\bar{T}^{\circ}\text{C}$	\bar{P}	\bar{E}	R 3.9	R 3.12	R 3.18	R 3.20	$\bar{T}^{\circ}\text{C}$	\bar{P}	\bar{E}	R 3.9	R 3.12	R 3.18	R 3.20
1	4,54	690	476	195	188	203	193	5,38	700	477	198	183	207	192
2	4,73	696	503	182	175	190	184	5,63	708	514	180	166	188	178

Таблица 4.11 – Средние значения стока Волги у Волгограда по сценариям и версиям CMIP3

Уравнения Сценарии	Версия №1										
	Период 2011 – 2030 годов					Период 2041 – 2060 годов					
	(3.9)	(3.12)	(3.18)	(3.20)	Сред.	(3.9)	(3.12)	(3.18)	(3.20)	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	
SRES A1B	184	178	191	184	184	180	160	191	178	177	
SRES B1	182	175	190	184	183	180	166	188	178	178	
Среднее	183	177	190	165	184	180	162	189	177	177	

Данные, полученные в ходе расчетов изменений климата будущего в бассейне Волги с помощью «МОЦАО» пятого поколения (CMIP 5) для RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 были использованы для оценки изменения среднемноголетнего стока. Основу проекта CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5) составили так называемые RCP (Representative concentration pathways: репрезентативные траектории концентраций). В этой новой системе сценариев RCP индекс сценария характеризует величину антропогенного радиационного воздействия, достигаемого в 2100 г., а именно: 2.6, 4.5 и 8.5 Вт/м² в RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5 [103]. В таблицах 4.12, 4.13 и 4.14 приведены результаты оценки изменения притока речных вод по различным сценариям климатических моделей

будущего по МОЦАО, рассмотренных в пятом (СМIP5) оценочном докладе МГЭИК, для двух версий, различающихся по базовому периоду.

Таблица 4.12 – Средние за 20-летие значения притока речных вод бассейна р. Волги до г. Волгограда по моделям для сценария RCP2.6 (СМIP5) для двух версий с учетом осадков, испарения и температуры воздуха.

Версия	Сценарий RCP2.6													
	Период 2011 – 2030 годов							Период 2041 – 2060 годов						
	$\bar{T}^{\circ}\text{C}$	\bar{P}	\bar{E}	R 3.9	R 3.12	R 3.18	R 3.20	$\bar{T}^{\circ}\text{C}$	\bar{P}	\bar{E}	R 3.9	R 3.12	R 3.18	R 3.20
1	4,68	690	4,76	195	186	203	192	5,41	710	476	201	186	212	196
2	4,93	695	504	182	172	189	181	5,63	719	526	177	163	186	178

Таблица 4.13 – Средние за 20-летие значения притока речных вод бассейна р. Волги до г. Волгограда по моделям для сценария RCP4.5 (СМIP5) для двух версий с учетом осадков, испарения и температуры воздуха.

Версия	Сценарий RCP4.5													
	Период 2011 – 2030 годов							Период 2041 – 2060 годов						
	$\bar{T}^{\circ}\text{C}$	\bar{P}	\bar{E}	R 3.9	R 3.12	R 3.18	R 3.20	$\bar{T}^{\circ}\text{C}$	\bar{P}	\bar{E}	R 3.9	R 3.12	R 3.18	R 3.20
1	4,68	690	476	195	186	203	192	5,99	715	477	202	182	213	194
2	4,93	701	509	181	172	188	182	6,23	724	509	188	167	183	183

Таблица 4.14 – Средние за 20-летие значения притока речных вод бассейна р. Волги до г. Волгограда по моделям для сценария RCP8.5 (СМIP5) для двух версий с учетом осадков, испарения и температуры воздуха.

Версия	Сценарий RCP8.5													
	Период 2011 – 2030 годов							Период 2041 – 2060 годов						
	$\bar{T}^{\circ}\text{C}$	\bar{P}	\bar{E}	R 3.9	R 3.12	R 3.18	R 3.20	$\bar{T}^{\circ}\text{C}$	\bar{P}	\bar{E}	R 3.9	R 3.12	R 3.18	R 3.20
1	4,81	695	476	197	187	205	194	6,71	720	478	203	177	215	191
2	5,03	701	519	175	166	182	177	6,93	728	535	175	150	184	169

Исследования трансформации стока бассейна Волги у Волгограда по результатам 5-го поколения (СМIP 5) и с использованием разработанных нами моделей связи стока от его определяющих факторов (3.9), (3.12), (3.18) и (3.20) показали следующие результаты:

Согласно сценарию RCP2.6 (таблица 4.12) норма годового стока р. Волги в зоне формирования у Волгограда для версии 1 изменяется от 186 мм (253 км³/год) до 203 мм (276 км³/год) на уровне 2011 – 2030 годов и от 186 мм (253 км³/год) до

212 мм (288 км³/год) на уровне 2041 – 2060 годов. Для версии 2 норма годового стока Волги у Волгограда изменяется от 172 мм (234 км³/год) до 189 мм (257 км³/год) на уровне 2011 – 2030 годов и от 163 мм (222 км³/год) до 186 мм (253 км³/год) на уровне 2041 – 2060 годов. Как видно из таблицы 4.15 осредненная по уравнениям норма стока р. Волги у Волгограда для версии 1 составляет 194 мм/год (264 км³/год) на уровне 2011 – 2030 годы (рост на 5 мм/год (7 км³/год)), а на уровне 2041 – 2060 годов – 199 мм/год (271 км³/год) (рост на 10 мм/год (14 км³/год)). Для версии 2 – 181 мм/год (246 км³/год) на уровне 2011 – 2030 года, снизилось на 8 мм/год (11 км³/год), а на уровне 2041 – 2060 годов – 176 мм/год (239 км³/год), т.е. уменьшение на 13 мм/год (18 км³/год). Как показывают результаты, приведенные в таблице 4.15 схожая ситуация имеет место применительно к сценариям RCP4.5 и RCP8.5. Таким образом, исследование изменения среднемноголетнего притока речных вод бассейна р. Волги у Волгограда с учетом сценариев СМIP5 выявило, что в зависимости от базового периода могут быть разные результаты. Так например, для версии 1 наблюдается увеличение нормы речного стока на уровне 2011-2030 годов, соответственно 195 мм/год (265 км³/год) и 198 мм/год (269 км³/год), а для версии 2 наоборот имеет место уменьшение – соответственно 179 мм/год (243 км³/год) и 175 мм/год (238 км³/год) по сравнению с базовым периодом (за базовый период принят современный климат – 1901/1902 – 2020/2021 гг., n=120 лет, норма условно-естественного стока Волги в зоне формирования у Волгограда составляет 189 мм/год (257 км³/год)).

Таблица 4.15 – Средние значения притока речных вод реки Волги по разным сценариям и версиям СМIP5.

Уравнения Сценарий	Версия №1									
	Период 2011 – 2030 годов					Период 2041 – 2060 годов				
	(3.9)	(3.12)	(3.18)	(3.20)	Сред.	(3.9)	(3.12)	(3.18)	(3.20)	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

4.4. Оценка изменения среднемноголетнего притока речных вод методом тенденций

Заблаговременные и достоверные оценки гидрологических режимов рек являются одним из важнейших направлений современной гидрологической науки. Это объясняется тем, что обоснованные оценки гидрологических режимов речных систем страны являются основой для рационального функционирования многих секторов экономики, включая социальную и экологическую среду. В настоящее время, результаты оценки предстоящего гидрологического режима речного стока широко используются для планирования систем промышленного и бытового водоснабжения и орошения, работы гидроэлектрических станций, судоходства, обводнения территории, особенно в засушливые годы, а также для предупреждения опасных гидрологических явлений (наводнения, прохождения паводков и т.п.). Нужно отметить, что с накоплением гидрометеорологической информации, являющейся основой для увеличения временных гидрометеорологических рядов, которые создают научную базу для выявления закономерностей в развитии гидрологических процессов. Это позволяет разработать более надежные и обоснованные методы оценки режимов притока речных вод в ключевых гидроузлах водохозяйственной системы страны как в ближайшем будущем, так и в отдаленной перспективе. В этом разделе проведены исследования с использованием метода тенденций, а также осуществлена оценка изменений среднемноголетних объемов притока речных вод к Волгоградскому гидроузлу на 2030 и 2050 годы. Для статистического анализа использованы достаточно длительные временные стоковые ряды (условно-естественные), охватывающие два периода: 1881/1882 – 2020/2021 гг. ($n=140$ лет) и 1914/1915 – 2020/2021 гг. ($n=107$).

Рассмотрим временной стоковый ряд, выраженный либо расходом воды (Q_i), либо объемом воды (W_i). Для прогнозирования объема (расхода) притока речных вод к гидроузлам осуществляется оценка наличия тенденций, характерных для динамического гидрологического ряда W_1, W_2, \dots, W_n , где n – количество

расчетных временных отрезков в данном ряду (годы). Назовем величины $W_i (Q_i)$ уровнем гидрологического ряда в момент времени t , а закон эволюции уровня гидрологического процесса во времени – трендом. Тренд может быть выражен как детерминированными, так и случайными функциями, либо их комбинациями [93, 123, 141, 144].

Уравнение детерминированного тренда имеет следующий вид:

$$W(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \quad (4.14)$$

Уравнения тренда случайного процесса

$$W(t) = W(t-1) + u_t = W_0 + \sum_{i=1}^t u_i \quad (4.15)$$

Уравнения тренда смешанного типа

$$W(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + u(t) = m(t) + u(t) \quad (4.16)$$

где: a_0, a_1, a_2 – постоянные коэффициенты; $u(t)$ – случайная функция; W_0 – некоторое начальное значение; $m(t)$ – детерминированная функция.

Результаты многолетних исследований в области гидрологии показывают, что речной сток как динамико – стохастический процесс может быть представлен регрессионным уравнением в виде [54, 104, 110, 166]:

$$K_{i+1}(K_i) = \bar{K}_{(i+1)} + r \frac{\sigma_{k(i+1)}}{\sigma_{k_i}} (K_i - \bar{K}_i) + \Phi_{i+1} C_{V(i+1)} \sqrt{1-r^2} \quad (4.17)$$

где: $K_{i+1}(K_i)$ – условное значение K_{i+1} при заданном K_i ; $\bar{K}_{(i+1)}, \bar{K}_i$ – среднемноголетнее значения коэффициента стока $(i+1)$ -го и i -го года; $\sigma_{k(i+1)}$ и σ_{k_i} – среднеквадратичные отклонения годовых объемов речного стока; r – коэффициент корреляции между стоками смежных лет; $C_{V(i+1)}$ – коэффициент изменчивости.

В уравнение (4.17) первые слагаемые отражают детерминированный аспект формирования годового речного стока, тогда как последнее слагаемое представляет собой случайную составляющую этого процесса. В этой связи,

уравнение (4.17) гармонично соотносится с уравнением (4.16), что указывает на то, что формированию среднемноголетних значений годовых объемов (расходов) речного стока свойственна тенденция, являющаяся функцией времени, которая может служить основой для оценки (прогноза) его значений в будущем. Таким образом, для оценки возможных изменений среднемноголетних годовых объемов (расходов) речного стока (норма стока) можно применить метод тенденций. Эта возможность также объясняется принятием в гидрологии концепции квазистационарности в многолетних колебаниях речного стока.

Метод тенденций – это метод прогноза речного стока путем экстраполяции его уравнения связи. Вместе с тем известно, что экстраполяция любой кривой может быть произведена несколькими способами, которые отличаются друг от друга исходными предпосылками и точностью. Все существующие способы экстраполяции делятся на две группы – линейные и нелинейные. Способ линейного экстраполяции основан на предположении постоянства градиента рассматриваемого процесса во времени. В отличие от этого способа нелинейное экстраполяция основано на предположении о непостоянстве градиента рассматриваемого процесса во времени. Экстраполяция нормы речного стока как в первом случае, так и во втором производится аналитическим уравнением рассматриваемого процесса. Практическое осуществление этого способа выполняется следующим образом:

Предположим, имеется отрезок графика изменения среднемноголетнего значения годовых объемов речного стока (рисунок 4.5) за период от t_0 до t (период наблюдения), причем t начало экстраполяции (прогноза). Предположим, что требуется дать прогноз среднемноголетнего объема годового стока в момент $t + \tau_2$, т.е. заблаговременности τ_2 . Обозначим приращение нормы стока в период от t до $t + \tau_2$, через ΔW_{τ_2} , а приращение t_0 до t через ΔW_{τ_1} .

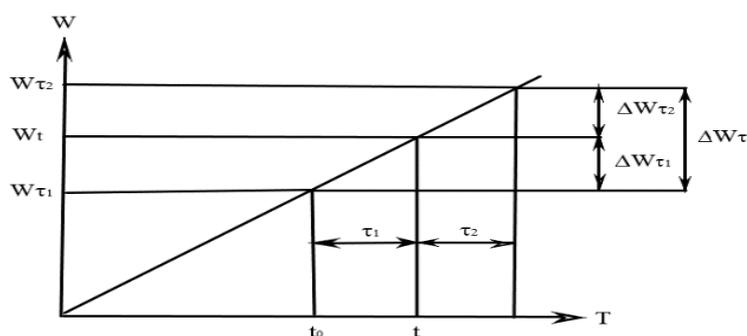


Рисунок 4.5 – Линейные изменения нормы стока.

$$W_{\tau_2} = W_t + \Delta W_{\tau_2} \quad \text{или} \quad W_{\tau_2} = W_{\tau_1} + \Delta W_{\tau} \quad (4.18)$$

где: W_{τ_2} – норма стока в момент $t + \tau_2$, т.е. прогноз нормы стока с заблаговременностью τ_2 ; W_t – норма годового стока в момент t (начало периода, когда осуществляется прогноз); W_{τ_1} – норма годового стока в момент t_0 (начало периода наблюдений); $\Delta W_{\tau} = \Delta W_{\tau_1} + \Delta W_{\tau_2}$ – суммарные изменение нормы годового стока от момента $t - \tau_1$ до $t + \tau_2$.

Используя вышеприведенный метод тенденций, осуществлена оценка изменения среднемноголетнего притока речных вод в зоне формирования у Волгограда в первой половине XXI века. На рисунке 4.6 приведены графики, которые показывают, что многолетние колебания речного стока и определяющие его климатические факторы относятся к разряду сложных природных процессов. При их анализе видим, что в многолетнем колебании речного стока бассейна свойственны периоды, различающиеся по водности. Так, например, в ряде 1881/1882 – 2020/2021 гг. обнаружены три квазистационарных периода: 1) 1881/1882 – 1929/1930 гг. ($n=49$ лет) – норма стока $259 \text{ км}^3/\text{год}$; 2) 1930/1931 – 1976/1977 гг. ($n=47$ лет) – норма стока $241 \text{ км}^3/\text{год}$; 3) 1977/1978 – 2020/2021 гг. ($n=44$ года) – норма стока $273 \text{ км}^3/\text{год}$ (рисунок 4.6 а)). В ряду 1914/1915 – 2020/2021 гг. – два периода: 1914/1915 – 1976/1977 ($n=63$ года) длительный маловодный период с нормой стока $246 \text{ км}^3/\text{год}$ и многоводный период 1977/1978 – 2020/2021 гг. ($n=44$ года) с нормой стока $276 \text{ км}^3/\text{год}$ (рисунок 4.6 б)).

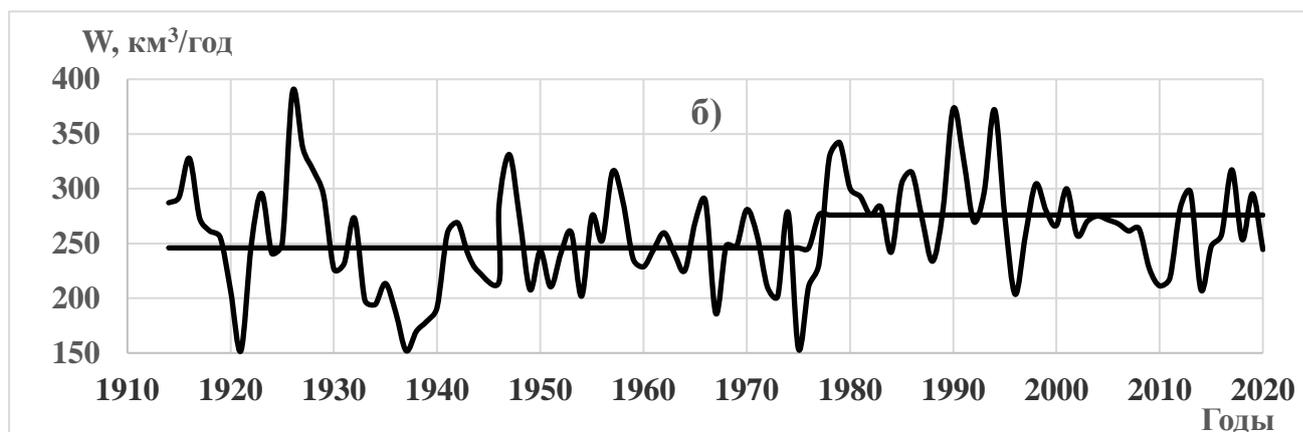
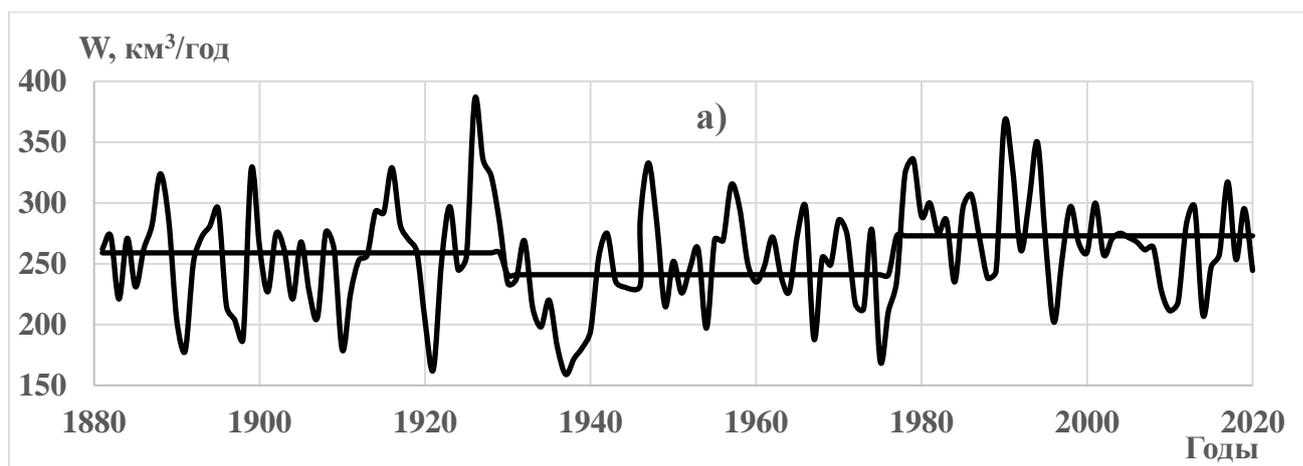


Рисунок 4.6 – График изменения стока Волги: а) годового объема стока за 1881/1882 – 2020/2021 гг. с 3 периодами 1881/1882 – 1929/1930 гг., 1930/1931 – 1976/1977 гг. и 1977/1978 – 2020/2021 гг.; б) годового объема стока за 1914/1915 – 2020/2021 гг. с 2 периодами 1914/1915 – 1976/1977 гг. и 1977/1978 – 2020/2021 гг.

Таблица 4.16 – Статистические параметры условно-естественного годового стока Волги в зоне формирования у Волгограда.

Период наблюдений	Кол-во лет наблюдений	Норма годового стока, W , км ³ /Год	Среднеквадратическое отклонение, σ_W , км ³ /Год	Коэффициент вариации C_V	Коэффициент асимметрии $C_S = 2C_V$	Коэффициент автокорреляции, $r[1]$
Статистические параметры годового стока р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда за период 1881/1882 – 2020/2021 гг.						
1881/1882-2020/2021	140	257	43	0,17	0,34	0,40
1881/1882-1929-1930	49	259	45	0,17	0,34	0,36
1930/1931-1976/1977	47	241	40	0,17	0,34	0,41
1977/1978-2020/2021	44	273	37	0,14	0,28	0,21
Статистические параметры годового стока р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда за период 1914/1915 – 2020/2021 гг.						
1914/1915-2020/2021	107	258	46	0,18	0,36	0,46
1914/1915-1976/1977	63	246	47	0,19	0,38	0,44
1977/1978-2020/2021	44	276	39	0,14	0,28	0,27

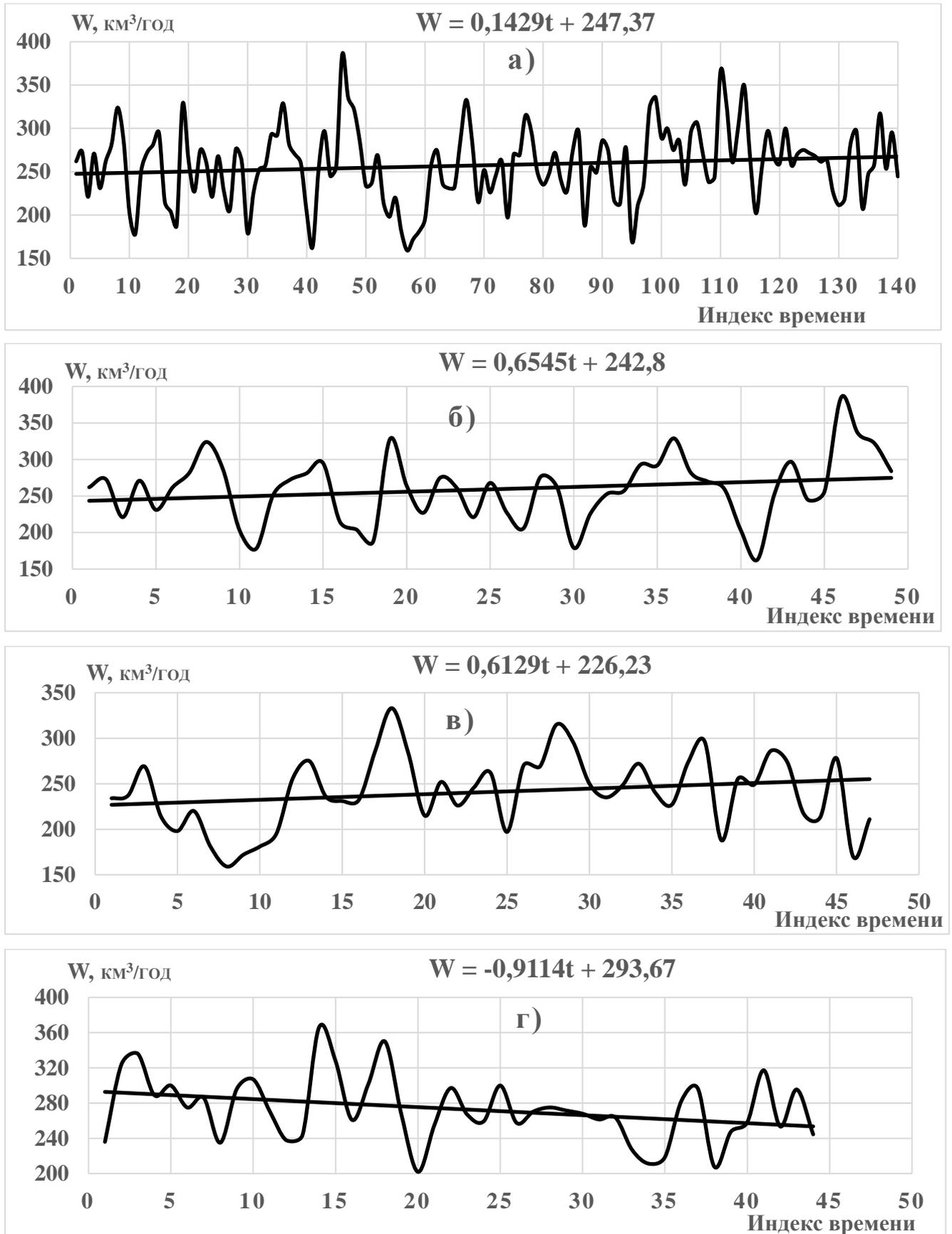


Рисунок 4.7 – Условно-естественный объем годового стока Волги в зоне формирования у Волгограда: а) за период 1881/1882 – 2020/2021 гг.; б) за период 1881/1882 – 1929/1930 гг.; в) за период 1930/1931 – 1976/1977 гг.; г) за период 1977/1978 – 2020/2021 гг.

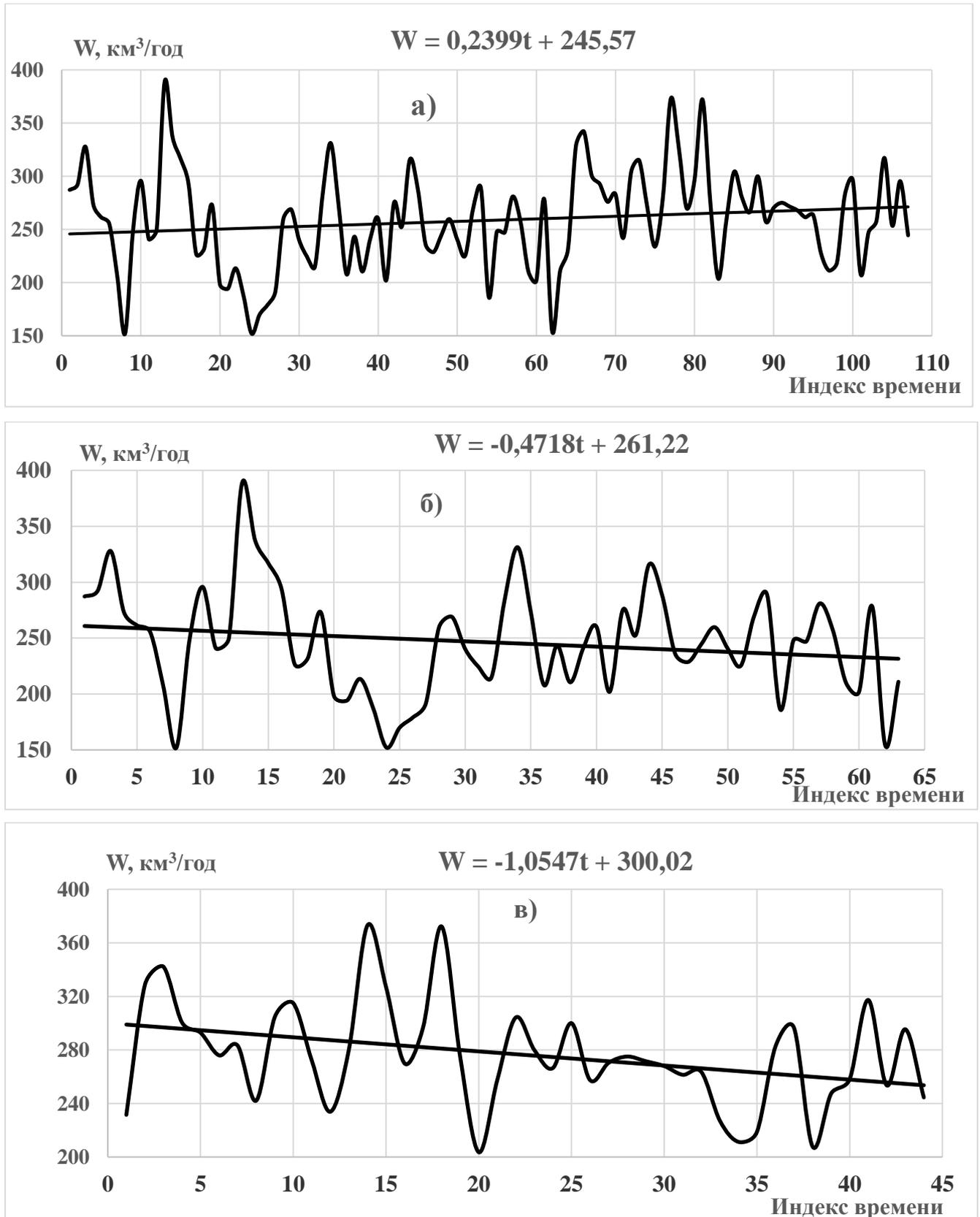


Рисунок 4.8 – Условно-естественный объем годового стока Волги в зоне формирования у Волгограда: а) за период 1914/1915 – 2020/2021 гг.; б) за период 1914/1915 – 1976/1977 гг.; в) за период 1977/1978 – 2020/2021 гг.

В таблице 4.16 приведены статистические параметры этих периодов. Среднемноголетний объем годового стока варьируется от 241 до 273 км³/год для ряда 1881/1882 – 2020/2021 гг. и от 246 до 276 км³/год для ряда 1914/1915 – 2020/2021 гг. В отличие от нормы стока, коэффициент вариации изменяется в небольшом диапазоне – 0,17 – 0,19 за исключением периода 1977/1978 – 2020/2021 гг., который составляет 0,14. Таким образом, анализ динамики гидрологических процессов в бассейне р. Волги показывает, что в XX и начале XXI века формированию объема (расхода) годового стока свойственна не только стохастическая составляющая, но он обладает и детерминированной составляющей в виде тренда. Это подтверждают графики, приведенные на рисунках 4.7 и 4.8.

Как видно из этих графиков (рис. 4.7 и 4.8) им свойственны разнонаправленные (возрастающие и понижающие) тренды. Используя метод наименьших квадратов (МНК) для этих трендов, были получены линейные уравнения в виде:

$$W_{\text{ср.}}(t) = 0,1429t + 247,37, \text{ за период } 1881/1882\text{-}2020/2021 \text{ гг.} \quad (4.19)$$

$$W_{\text{ср.}}(t) = 0,6545t + 242,80, \text{ за период } 1881/1882\text{-}1929/1930 \text{ гг.} \quad (4.20)$$

$$W_{\text{ср.}}(t) = 0,6129t + 226,23, \text{ за период } 1930/1931\text{-}1976/1977 \text{ гг.} \quad (4.21)$$

$$W_{\text{ср.}}(t) = -0,9114t + 293,67, \text{ за период } 1977/1978\text{-}2020/2021 \text{ гг.} \quad (4.22)$$

$$W_{\text{ср.}}(t) = 0,2399t + 245,57, \text{ за период } 1914/1915\text{-}2020/2021 \text{ гг.} \quad (4.23)$$

$$W_{\text{ср.}}(t) = -0,4718t + 261,22, \text{ за период } 1914/1915\text{-}1976/1977 \text{ гг.} \quad (4.24)$$

$$W_{\text{ср.}}(t) = -1,0547t + 300,02, \text{ за период } 1977/1978\text{-}2020/2021 \text{ гг.} \quad (4.25)$$

Полученные линейные уравнения (4.19) – (4.25) прежде всего позволяют оценить, как изменяется динамическая норма годового стока $W_{\text{ср.}}(t)$ за рассматриваемые расчетные периоды времени (таблица 4.17). В исследовании под динамической нормой стока понимается норма стока, которая меняется в зависимости от различных периодов времени, выделенных в длительном временном ряде. Так, например, для 1 ряда – условно-естественного стока (период

1881/1882 – 2020/2021 гг.) динамическая среднемноголетняя величина стока за рассматриваемый период изменяется от 248 до 267 км³/год, т. е. увеличивается на 19 км³/год. За этот же период статистическая величина среднемноголетнего речного стока составляет 257 км³/год, т. е. приток речных вод р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда за период 140 лет увеличился на 10 км³/год. Для периода 1881/1882 – 1929/1930 гг. – 16 км³/год, для периода 1930/1931 – 1976/1977 гг. – 14 км³/год. Альтернативой повышению нормы стока служит уменьшение нормы стока, которое наблюдается в периоде 1977/1978 – 2020/2021 гг. и составляет -19 км³/год. Аналогичные результаты получены при исследовании 2 ряда – условно-естественного стока (1914/1915 – 2020/2021 гг.) (таблица 4.17). Из вышеизложенного следует, что речной сток бассейна Волги определяется не только статистическим среднемноголетним значением объема (расхода), но также включает в себя динамический среднемноголетний объем (расход) воды, который зависит от времени. В связи с этим, выявленные однонаправленные тенденции (тренды) в многолетних колебаниях речного стока бассейна Волги, характерные для определенных временных периодов, а также их функциональные уравнения (4.19) – (4.25), могут служить основой для прогнозирования изменений среднемноголетних значений (норм) речного стока бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда [83].

Таблица 4.17. Оценка изменения среднемноголетнего (нормы) стока бассейна р. Волги у г. Волгограда за различные периоды, км³/год.

Период наблюдений	Кол-во лет наблюдений	W _{ср.} за период наблюдений	Значения нормы стока		Изменение нормы стока за период	Изменение нормы стока конец периода от среднего
			начало периода	конец периода		
1881/1882-2020/2021	140	257	248	267	19	10
1881/1882-1929/1930	49	259	243	275	32	16
1930/1931-1976/1977	47	241	227	255	28	14
1977/1978-2020/2021	44	273	293	254	-39	-19
1914/1915-2020/2021	107	258	246	271	25	13
1914/1915-1976/1977	63	246	261	235	-26	-11
1977/1978-2020/2021	44	276	299	254	-45	-22

Примечание. Оценка нормы стока в начале и конце периода осуществлялась по уравнениям (4.19) – (4.25).

Исследовано предполагаемое изменение среднемноголетнего объема годового стока Волги в зоне формирования у Волгограда для 2030 года ($\tau = 10$ лет) и для 2050 года ($\tau = 30$) (таблица 4.18).

Таблица 4.18 – Прогноз изменения среднемноголетнего объема годового стока Волги в зоне формирования у Волгограда по выявленным тенденциям для базовых периодов 1881/1882 – 2020/2021 гг. и 1914/1915 – 2020/2021 гг.

№ п/п	Периоды	$W_{\text{ср.}}$ за период км ³ /год	Прогнозы $W_{\text{ср}}$, периода, км ³ /год		Приращение, км ³ /год (в %)	
			Уровень 2030 г.	Уровень 2050 г.	Уровень 2030 г.	Уровень 2050 г.
1.	1881/1882-2020/2021 n=140 лет	257	269	272	12(5)	15(6)
2.	1881/1882-1929/1930 n=49 лет	259	281	294	22(8)	35(14)
3.	1930/1931-1976/1977 n=47 лет	241	261	273	20(8)	32(13)
4.	1977/1978-2020/2021 n=44 года	273	244	226	-29(11)	-47(17)
5.	1914/1915-2020/2021 n=107 лет	258	274	278	16(6)	20(8)
6.	1914/1915-1976/1977 n=63 года	246	227	217	-19(8)	-29(12)
7.	1977/1978-2020/2021 n=44 года	276	243	222	-33(12)	-54(20)

В качестве отправной точки для оценки (прогноза) принят 2020 год при базовом периоде 1881/1882 – 2020/2021 гг. (ряд 1) и 1914/1915 – 2020/2021 гг. (ряд 2.). Предполагая, что выявленные тренды, представленные на рисунках 4.7 и 4.8, сохранятся в первой половине XXI века, мы получаем следующие прогнозы изменения среднемноголетнего объема годового объема стока Волги (таблица 4.18). За первую половину XXI века среднемноголетний условно-естественный сток Волги может колебаться от 227 до 281 км³/год (уровень 2030 года) и от 217 до 294 км³/год (2050 год). При этом увеличение по сравнению со статистической нормой стока за базисный период 1881/1882 – 2020/2021 гг. составляет 12 км³/год (2030 год) и 15 км³/год (2050 год), для второго ряда 1914/1915 – 2020/2021 гг. увеличение составило– 16 км³/год (2030 год) и на 20 км³/год (2050 год). Альтернативой длинным временным рядам (n=140 лет и n=107 лет) выступает

исследование более короткого базисного периода 1977/1778 – 2020/2021 гг. (n= 44 года). Здесь наблюдается тенденция уменьшения нормы стока на 29 – 33 км³/год (2030 год) и 47 – 54 км³/год (2050 год). Это свидетельствует о том, что в первой половине XXI века тенденция положительного тренда может измениться на отрицательный тренд, т. е. может происходить уменьшение притока речных вод бассейна Волги в зоне формирования.

Таким образом, обобщая представленные результаты, можно сделать вывод, что в первой половине XXI века среднемноголетний объем годового стока Волги может увеличиваться, так уменьшаться. Следовательно, говорить о резких изменениях климата в ее бассейне не следует. Ожидаются циклические колебания, характерные для речного стока, включая чередование многоводных лет с маловодными, что связано с фазами потепления и похолодания, обладающими динамическим средним с различной интенсивностью [83].

4.5. Вероятностная оценка притока речных вод с использованием динамико-стохастического подхода

Результаты исследований XX века в области гидрологии со всей очевидностью показывают, что преобладающим направлением в развитии гидрологических процессов является стохастическая концепция [23, 24, 66, 93, 104, 135, 157, 132, 141, 151]. Анализ развития гидрологических процессов в речных бассейнах указывает на важность генетических концепций, которые подчеркивают наличие детерминированной составляющей в этих процессах [5, 10, 43, 101, 103, 108, 128, 148]. В 30-ые годы прошлого века в гидрологии активно развивались эмпирические методы, которые, хотя и были лишь приблизительными, соответствовали требованиям практики. Даже самые простые эмпирические модели оценивались специалистами как значительные достижения и быстро внедрялись в практику. После 1930 года методы теории вероятностей и математической статистики стали широко применяться в исследовании речного стока [23, 24, 56, 62, 67, 93, 104, 123, 132, 135, 141, 157, 105, 144, 152]. Генетический

подход к созданию эмпирических формул и обобщение теоретических исследований играют ключевую роль в развитии гидрологических процессов. Важно отметить, что основным методом изучения этих процессов является физический анализ гидрологических явлений, который позволяет глубже понять их внутреннюю структуру и выявить закономерности. В настоящее время в исследовании динамики гидрологических процессов преобладает динамико-стохастическая концепция, применяемая для оценки и прогнозирования межгодовой и сезонной изменчивости многолетнего колебания речного стока [54, 84, 110, 124, 135]. В рамках динамико-стохастической концепции изменение любой гидрологической характеристики речного стока на различных участках реки воспринимается как случайный процесс, непрерывно изменяющийся во времени. В этом контексте случайные колебания речного стока взаимодействуют с детерминированными изменениями. Детерминированные изменения режима речного стока проявляются по двум основным причинам. Во-первых, они выражаются через функциональные зависимости водности рек от времени, что может проявляться как в виде монотонно направленных, так и периодических трендов [67, 85, 88, 89, 133]. Во-вторых, эти изменения зависят от гидрологической и метеорологической ситуации, существовавшей в период, предшествующий исследуемому отрезку времени [104, 105, 135]. Таким образом, динамико-стохастическая природа колебаний речного стока определяет подход к его прогнозированию на несколько лет вперед. Предсказание будущих значений речного стока состоит из двух основных элементов. Первый элемент представляет собой однозначно детерминированные явления, которые наблюдаются регулярно. Второй элемент описывает распределения вероятностей колебаний речного стока, рассматриваемых как случайные отклонения от средних значений, изменяющихся с течением времени (раздел 4.1). Инструментом для прогнозирования будущей динамики речного стока служит описание детерминистической закономерности, выражающей зависимость стока от времени (раздел 4.4). В первую очередь, речь идет о выявлении длительных тенденций увеличения или уменьшения водности речных бассейнов, а также о многолетних периодических колебаниях (раздел 3.1).

Важно отметить, что в наблюдаемых рядах годового стока видна определенная цикличность, проявляющаяся в наличии чередующихся периодов многоводных и маловодных лет. При этом чередование этих периодов на различных реках происходит по-разному. Цикличность речного стока объясняется тем, что в условиях значительных осадков часть воды задерживается в углублениях рельефа, в почве-грунтах, озерах, болотах и других водоемах, и в последующие годы возвращается в русло реки. С увеличением временного промежутка связь между годами, как правило, ослабевает и в конечном итоге исчезает. Если бы такие изменения могли быть предсказаны в календарной последовательности, то это стало бы оптимальной основой прогнозирования гидрологических процессов в водохозяйственной практике. Тем не менее, в реальных условиях значительную роль играют вероятностные закономерности, отражающие случайные колебания речного стока [23, 24, 25, 105, 123, 132, 135]. Исходя из вышеизложенного, в данном разделе формулируется и решается задача оценки вероятностного предсказания изменений многолетних колебаний гидрологических характеристик годового объема воды $W(t)$ речного бассейна на уровне 2030 и 2050 годов. Это включает в себя построение кривых обеспеченности притока речных вод бассейна Волги в указанные периоды.

Многолетние колебания речного стока могут быть представлены в виде аддитивной функции

$$W(t) = m(t) + u(t) \quad (4.26)$$

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

Годовой объем притока речных вод W_{i+1} при заданном W_i определяется с помощью регрессионных уравнений в виде:

$$W_{i+1}(W_i) = \bar{W}_{i+1} + r \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i} (W_i - \bar{W}_i) + \Phi_{i+1} \sigma_{i+1} \sqrt{1-r^2} \quad (4.27)$$

где: $W_{i+1}(W_i)$ – объем годового стока W_{i+1} при заданном W_i ; σ_i и σ_{i+1} – среднеквадратические отклонения годовых объемов речного стока;

\bar{W}_i и \bar{W}_{i+1} – безусловные математические ожидания годовых объемов речного стока Φ_{i+1} – относительное отклонение ординаты кривой обеспеченности годовых величин стока от среднего значения (математическое ожидание). Величина Φ_{i+1} определяется по таблице Фостера-Рыбкина в зависимости от условного коэффициента асимметрии [131]; r – коэффициент корреляции смежных лет.

Если переходить от годовых объемов стока на модульные коэффициенты стока, тогда уравнение (4.27) примет вид:

$$K_{i+1}(K_i) = \bar{K}_{i+1} + r \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i} (K_i - \bar{K}_i) + \Phi_{i+1} C_{V(i+1)} \sqrt{1-r^2} \quad (4.28)$$

Поскольку рассматривается корреляция между смежными годами, т.е. исследуются связи членов некоторого ряда с членами того же ряда, смещенного на один год, то очевидно, что $\sigma_{i+1} = \sigma_i$, $\bar{K}_{i+1} = \bar{K}_i = 1$, тогда уравнение (4.28) примет вид:

$$K_{i+1}(K_i) = 1 + r(K_i - 1) + \Phi_{i+1} C_{V(i+1)} \sqrt{1-r^2} \quad (4.29)$$

Вводится гипотеза, согласно которой отношение $\frac{K_{i+1}(K_i)}{1+r(K_i-1)}$ распределено по кривой Пирсона III типа с условным коэффициентом вариации

$$C_{V,усл} = \frac{C_V \sqrt{1-r^2}}{1+r(K_i-1)} \quad (4.30)$$

где: C_V – безусловный коэффициент вариации.

Условный коэффициент асимметрии

$$C_{s,усл} = n C_{V,усл} = \frac{n C_V \sqrt{1-r^2}}{1+r(K_i-1)} \quad (4.31)$$

Используется трехпараметрическое гамма распределение С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля, n определяется методом подбора. В качестве критерия используются сопоставления эмпирической кривой обеспеченности с теоретической, для чего соотношения C_s / C_V могут приниматься 0.5, 1.0, 1.5, 2.0,

..., 6.0 [23]. Сравнивая регрессионную модель (4.29) с уравнением (4.26), можно прийти к выводу, что

$$m(t) = 1 + r(K_i - 1), \quad u(t) = \Phi_{i+1} C_{V(i+1)} \sqrt{1 - r^2} \quad (4.32)$$

Тогда регрессионная модель (4.29) в первом приближении рассматривается как модель для вероятностной оценки многолетних колебаний речного стока, т.е. для построения кривых обеспеченности как в современном климате, так для его изменений в будущем.

Развитие гидрологической характеристики $W(t)$ как стохастического процесса проявляет признаки нестационарности. Для исследования многолетних колебаний данной характеристики $W(t)$ необходимо ввести систематизацию ее изменений во времени, что позволит выявить способы ее анализа и прогнозирования. Если основой для систематизации послужат изменения основных статистических параметров, какими являются математическое ожидание (норма речного стока) $m(t)$ и $D(t) = D[W(t)]$ или среднеквадратическое отклонение $\sigma(t) = \sqrt{D(t)}$, то можно выделить два типа нестационарных процессов, наблюдаемых в рамках гидрологических процессов речного бассейна [84]. При изменении только математического ожидания $m(t)$ во времени возникает нестационарность первого порядка. При изменении математического ожидания $m(t)$ и дисперсии $D(t)$ или $C_V(t) = \sqrt{D(t)} / m(t) = \sigma(t) / m(t)$ во времени рассматривается нестационарность второго порядка. Таким образом, для вероятностной оценки изменений многолетних колебаний речного стока необходимо провести оценку изменения как математического ожидания, так и дисперсии в случае нестационарности второго порядка, или ограничиться лишь математическим ожиданием при нестационарности первого порядка. При наличии достаточно длительных временных рядов годовых и сезонных объемов речного стока $W(t)$ уравнение среднемноголетнего стока $m(t)$ и $\sigma(t) = \sqrt{D(t)}$ можно получить с применением наиболее распространенных методов, таких как метод наименьших квадратов (МНК), метод скользящего среднего, экспоненциального

сглаживания и других. На основании вышеизложенного, вероятностная оценка (прогноз) гидрологической характеристики годовых и сезонных объемов притока речных вод $W(t, p)$ в характерных створах речных систем осуществляется в следующей последовательности:

1. Заданы временной ряд, организованный из годовых и сезонных объемов притока речных вод $W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_n$, где n – количество расчетных временных отрезков времени в данном ряду (годы);
2. Одним из вышеуказанных методов, так например, метод наименьших квадратов и используя, заданный временной ряд $W(t)$ определяется функциональное уравнение $m(t)$, в случае нестационарности первого порядка, и уравнений $m(t)$ и $C_V(t)$, в случае нестационарности второго порядка;
3. Используя уравнения $m(t)$ и $C_V(t)$ осуществляется экстраполирование (прогноз) величины нормы речного стока и коэффициента изменчивости в момент $t + \Delta t$, т.е. заблаговременности Δt ;
4. Используя, трехпараметрическое гамма распределение С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля и значения $m(t)$ и $m(t + \Delta t)$, а также $C_V(t)$ и $C_V(t + \Delta t)$ строятся кривые обеспеченности в современном климате и кривые обеспеченности климата будущего. При этом $C_S = nC_V$ (n определяется методом подбора)

Объект исследования – бассейн Волги в зоне формирования у Волгограда. В качестве гидрологической характеристики годового и сезонного объема воды $W(t)$ были использованы два гидрологических ряд разной длительности, представленные на портале Мирового центра данных и АО «Институт Гидропроект», в частности многолетние среднегодовые и среднесезонные (половодье и межень) притока воды $W(t)$ за период 1881/1882 – 2020/2021 гг. ($n=140$ лет, ряд 1) и 1914/1915 – 2020/2021 гг. ($n=107$ лет, ряд 2). При анализе указанных временных рядов (раздел 4.4) выявлены: первому базовому периоду (расчетному, ряд 1) свойственны три подпериода – относительно многоводный с 1881/1882 – 1929/1930 гг. ($n=49$ лет, $W_{ср} = 259$ км³/год, $C_V = 0,17$, $C_S = 2C_V$),

сравнительно маловодный с 1930/1931 – 1976/1977 гг. ($n=46$ лет, $W_{cp} = 241$ км³/год, $C_V = 0,17$, $C_s = 2C_V$) и повышенный многоводный с 1977/1978 – 2020/2021 гг. ($n=45$ лет, $W_{cp} = 273$ км³/год, $C_V = 0,14$, $C_s = 2C_V$); второму базовому периоду (расчетному, ряд 2) – два подпериода – относительно достаточно маловодный с 1914/1915 – 1976/1977 гг. ($n=63$ лет, $W_{cp} = 246$ км³/год, $C_V = 0,19$, $C_s = 2C_V$) и сравнительно многоводный с 1977/1978 – 2020/2021 гг. ($n=44$ лет, $W_{cp} = 246$ км³/год, $C_V = 0,14$, $C_s = 2C_V$). Статистические показатели годового и сезонного стока Волги для различных периодов времени имеют существенные различия (раздел 4.4). Несмотря на это, гипотеза однородности выборочных дисперсий в данных выборках не отвергается. В ходе проверки однородности средних (нормы) по критерию Стьюдента, было обнаружено, что она имеет обратную картину [83, 84]. Эта оценка показала, что при 5% и менее высоких уровнях значимости материала наблюдений по стоку Волги за сравниваемые периоды не могут быть отнесены к числу однородных. В виду того, что критерий Стьюдента является более информативным, следует считать, что в целом сравниваемые ряды должны быть статистически неоднородными. Была получена N-кратная (в данном случае 7-кратная) выборка гидрологической характеристики $\{W(t) : t \in T\}$, характеризующая развитие гидрологических процессов в бассейне Волги как в условиях современного климата, так и в будущем (таблица 4.19). Каждый такой анализ позволяет сделать вывод о том, что каждая из таких выборок является предпосылкой для оценки не только статистических параметров кривых обеспеченности базовых периодов, но и для оценки (прогноза) характеристик этих кривых на предстоящие периоды и построения прогнозных кривых обеспеченности гидрологических характеристик $\{W(t) : t \in T\}$.

Таблица 4.19 – Статистические параметры условно-естественного годового стока Волги в зоне формирования у Волгограда и прогнозные значения среднемноголетнего годового объема стока, полученные по линейными уравнениям (4.19) – (4.25).

№ выбо рки	Периоды	Базовый период (период наблюдений)			$W_{cp.}$, Период прогноза, км ³ /год	
		$W_{cp.}$, км ³ /год	C_V	$C_S = 2C_V$	2030 г.	2050 г.
1	1881/1882 – 2020/2021, n=140 лет	257	0,17	0,34	269	272
2	1881/1882 – 1929/1930, n=49 лет	259	0,17	0,34	281	294
3	1930/1931 – 1976/1977, n=46 лет	241	0,17	0,34	261	273
4	1977/1978 – 2020/2021, n=45 лет	273	0,14	0,28	244	226
5	1914/1915 – 2020/2021, n=107 лет	258	0,18	0,36	274	278
6	1914/1915 – 1976/1977, n=63 год	246	0,19	0,38	227	217
7	1977/1978 – 2020/2021, n=44 лет	276	0,14	0,28	243	222

Используя, имеющиеся 7-кратные выборки (временные ряды) гидрологических характеристик $W(t):t \in T$ и МНК были получены линейные функциональные уравнения выявленных трендов (рисунки 4.7 и 4.8). Используя эти уравнения, был осуществлен прогноз изменения среднемноголетнего притока Волги в створе Волгоградского гидроузла на уровне 2030 и 2050 годов. В таблице 4.19 приведены статистические параметры годового притока Волги в зоне формирования у Волгограда для базовых периодов и прогнозы 2030 и 2050 годов. Эти данные послужили основой для построения кривых обеспеченности притока речных вод р. Волги у г. Волгограда как в современном климате, так и в будущем. Как показало наше исследование выделенных периодов и подпериодов, если их дисперсия однородна (стационарна), то норма (среднемноголетнее) неоднородна. Поэтому, рассматривается гипотеза развития гидрологических процессов в бассейне Волги как нестационарный процесс первого порядка, поэтому полученные значения C_V и $C_S = 2C_V$ по современному климату принимаются постоянными во времени и используются для построения прогнозных кривых

обеспеченности. Ординаты этих кривых обеспеченности приведены в таблице 4.20, а сами кривые обеспеченности на рисунках 4.9 и 4.10. Как видно из таблицы 4.20 и рисунков 4.9 и 4.10, кривые обеспеченности, полученные для каждой выборки годового речного стока Волги в зоне формирования, различаются между собой, что характеризует изменение условий формирования речного стока в этом бассейне за более, чем столетний период наблюдений. 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 видно из таблицы 4.20 и рисунков 4.9, 4.10 при сопоставлении ординаты кривых обеспеченности (выборка 1.1 и 1.4) в современном климате имеет место увеличение при большой обеспеченности 75%, 95% и 97% и прирост составляет 20, 24 и 25 км³/год соответственно (8 – 10%), в зоне малой обеспеченности наблюдается не большое увеличение – 2 – 4%. При сопоставлении ординаты кривых обеспеченности выборки 1.1 и 1.3 наблюдается обратная картина, уменьшение по всем квантилям от 4% до 10%. Анализ выборки 1.5, 1.6 и 1.7 базового периода 1914/1915 – 2020/2021 гг. дает аналогичные результаты и наблюдается как увеличение, так и уменьшения в пределах от 4 до 14%. Таким образом, при анализе данных наблюдений базисных 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 выборки 1.1 (современный базовый период – 1881/1882 – 2020/2021 гг.) с выборкой 2.1 (2030 г.) и с выборкой 3.1 (2050 г.) вероятность превышения (обеспеченность) притока речных вод Волги в зоне формирования увеличивается по всем квантилям в диапазоне от 7 до 19 км³/год (уровень 2030 г. от 3 до 7%) и от 8 до 24 км³/год (уровень 2050 г. от 3 до 9%) по сравнению с кривыми обеспеченности современного климата. Сравнение периодов и подпериодов

симметрично, т.е. выборка 1.2 (современный климат) с выборками 2.2 (2030 г.) и 3.2 (2050 г.), а также выборка 1.3 (современный климат) с выборками 2.3 (2030 г.) и 3.3 (2050 г.) увеличиваются вероятностные кривые обеспеченности по всем квантилям и колеблются в диапазоне от 11 – 36 км³/год (на уровне 2030 г. от 4 до 14%) и от 18 до 56 км³/год (на уровне 2050 г. от 7 до 22%). Альтернативой вероятностной оценки (прогноза) притока речных вод бассейна Волги у Волгограда могут служить кривые обеспеченности, полученные по выборкам 1.4, 2.4 и 3.4. При анализе таблицы 4.20 видим, что при сравнении ординаты кривых обеспеченностей по этим выборкам происходит уменьшение по всем квантилям в диапазоне от 18 до 43 км³/год (2030 г. от 7 до 17%) и от 30 до 70 км³/год (2050 г. от 12 до 27%).

Исследование временного ряда 2 показывает аналогичные результаты. Сравнение кривых обеспеченности базового периода современного климата (выборка 1.5) с прогнозным на уровне 2030 года (выборка 2.5) и с прогнозным уровнем 2050 года (выборка 3.5) наблюдается прирост по всем квантилям кривых обеспеченности, при этом увеличение составляет от 9 до 26 км³/год (2030 г. от 4 до 10%) и от 11 до 33 км³/год (2050 г. от 4 до 13%) по сравнению с современным климатом. Альтернативой этим вариантам выступают результаты выборки 1.6, 2.6 и 3.6, а также выборки 1.7, 2.7 и 3.7. При сопоставлении ординаты этих кривых обеспеченности притока р. Волги у г. Волгограда наблюдается уменьшение на величину от 10 до 49 км³/год (2030 г. от 4 до 19%) и от 15 до 81 км³/год (2050 г. от 6 до 31%). Таким образом, анализ ансамбля кривых вероятностей превышения (обеспеченности) притока Волги в зоне формирования у Волгограда показывает (таблица 4.20 и рисунки 4.9, 4.10), что за первую половину XXI века в водности данного бассейна может наблюдаться пестрая картина. Наряду с относительным увеличением притока Волги в зоне формирования у Волгограда (выборки 2.1, 2.2, 2.3 и 2.5 – 2030 г. и выборка 3.1, 3.2, 3.3 и 3.5 – 2050 г.), возможно и уменьшение его за первую половину XXI века (выборки 2.4, 2.6 и 2.7 – 2030 г. и выборки 3.4, 3.6 и 3.7 – 2050 г.) по сравнению с современным климатом. Уменьшение в первой половине XXI века притока Волги в зоне формирования может составить до 30% по сравнению с водностью базового периода 1977/1978 – 2020/2021 гг.

Таблица 4.20 – Объем условно-естественного годового притока Волги в зоне формирования у Волгограда при различной обеспеченности, км³/год

№ выб орки	Периоды	Обеспеченности, в %-ах										
		0,1	1,0	5,0	25	50	75	80	85	90	95	97
1	Базовый (расчетный) период											
1.1	1881/1882- 2020/2021	415	370	333	285	254	226	220	212	203	190	182
1.2	1881/1882- 1929/1930	418	373	336	287	256	228	222	214	205	192	183
1.3	1930/1931- 1976/1977	389	347	312	267	238	212	206	199	190	178	171
1.4	1977/1978- 2020/2021	408	370	339	297	271	246	241	234	225	214	207
1.5	1914/1915- 2020/2021	426	378	339	287	255	225	219	211	201	187	179
1.6	1914/1915- 1976/1977	416	368	328	276	243	213	206	198	188	175	166
1.7	1977/1978- 2020/2021	413	375	343	301	274	249	243	237	228	216	209
2	Оценка (прогноз) на уровне 2030 год											
2.1	1881/1882- 2020/2021	434	387	349	298	266	237	230	222	213	199	190
2.2	1881/1882- 1929/1930	454	405	364	311	278	247	241	232	222	208	199
2.3	1930/1931- 1976/1977	421	376	338	289	258	230	223	216	206	193	185
2.4	1977/1978- 2020/2021	365	331	303	266	242	220	215	209	202	191	185
2.5	1914/1915- 2020/2021	453	402	360	305	271	239	232	224	213	199	190
2.6	1914/1915- 1976/1977	384	339	302	254	224	196	190	183	174	161	153
2.7	1977/1978- 2020/2021	364	330	302	265	241	219	214	208	201	191	183
3	Оценка (прогноз) на уровне 2050 год											
3.1	1881/1882- 2020/2021	439	392	353	301	269	239	233	225	215	201	193
3.2	1881/1882- 1929/1930	475	423	381	326	291	259	252	243	232	218	208
3.3	1930/1931- 1976/1977	441	393	354	302	270	240	234	225	216	202	193
3.4	1977/1978- 2020/2021	338	307	281	246	224	204	199	194	187	177	171
3.5	1914/1915- 2020/2021	460	408	365	310	275	243	235	227	216	202	192
3.6	1914/1915- 1976/1977	367	324	289	243	214	188	182	175	166	154	147
3.7	1977/1978- 2020/2021	332	301	276	242	220	200	196	190	183	174	168

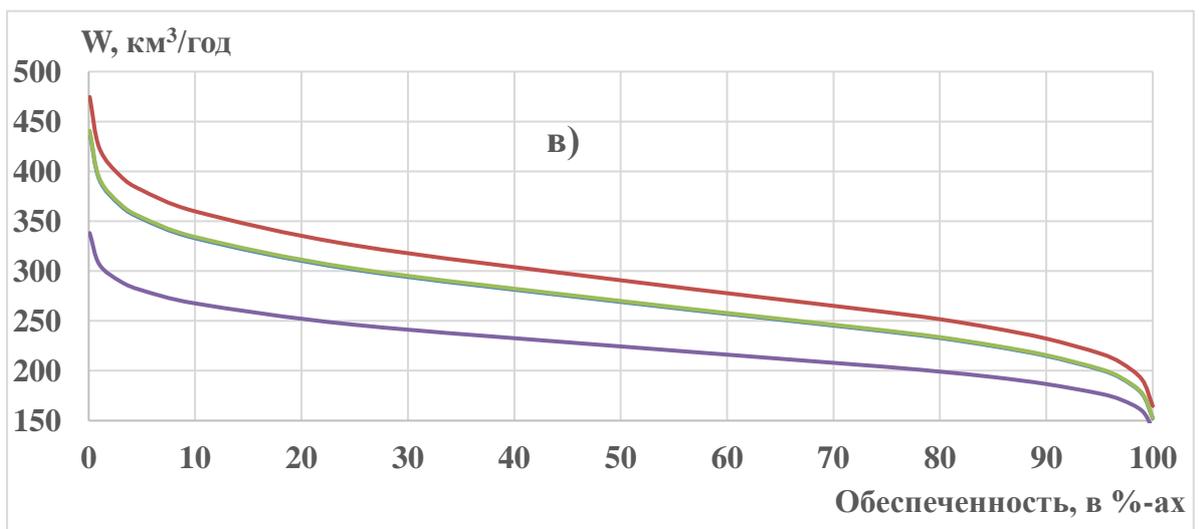
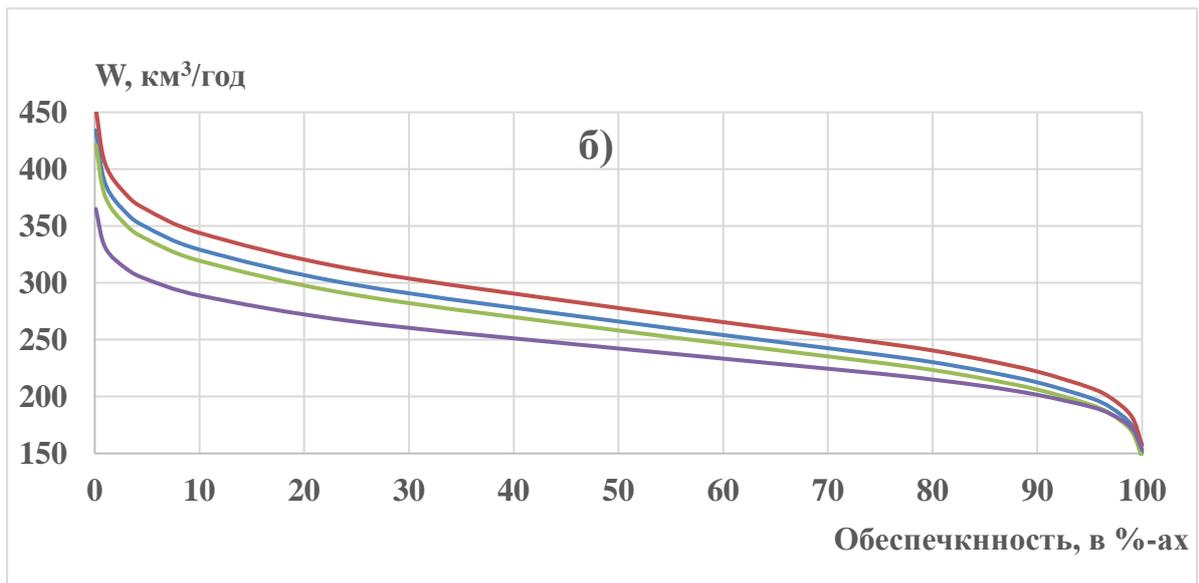
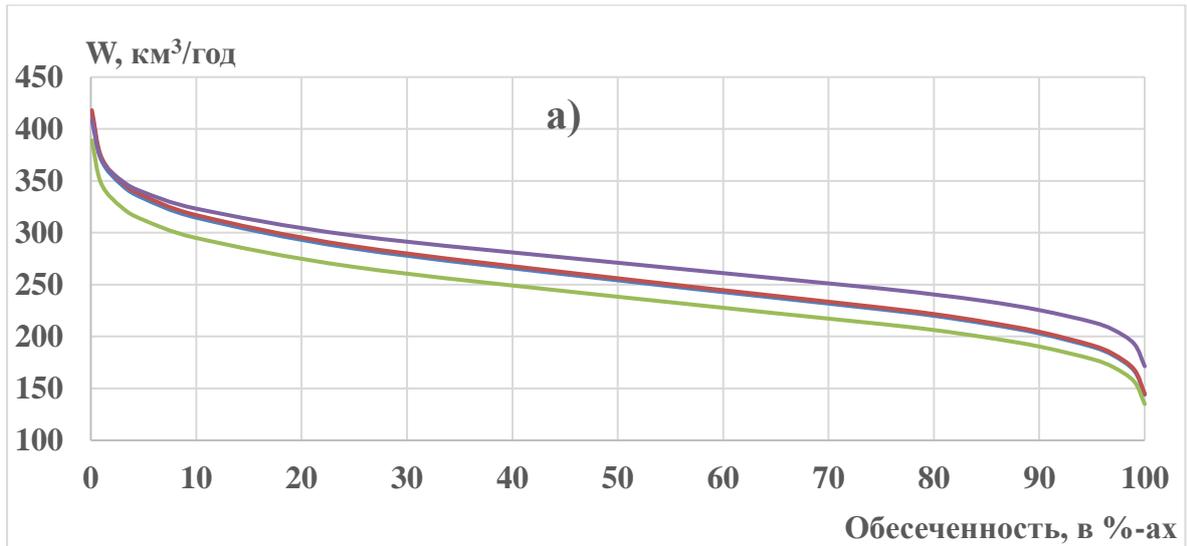


Рисунок 4.9 – Кривые обеспеченности условно-естественного годового объема р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда для ряда 1 (1881/1882 – 2020/2021 гг.): а) при современном климате; б) на уровне 2030 г.; в) на уровне 2050 г.

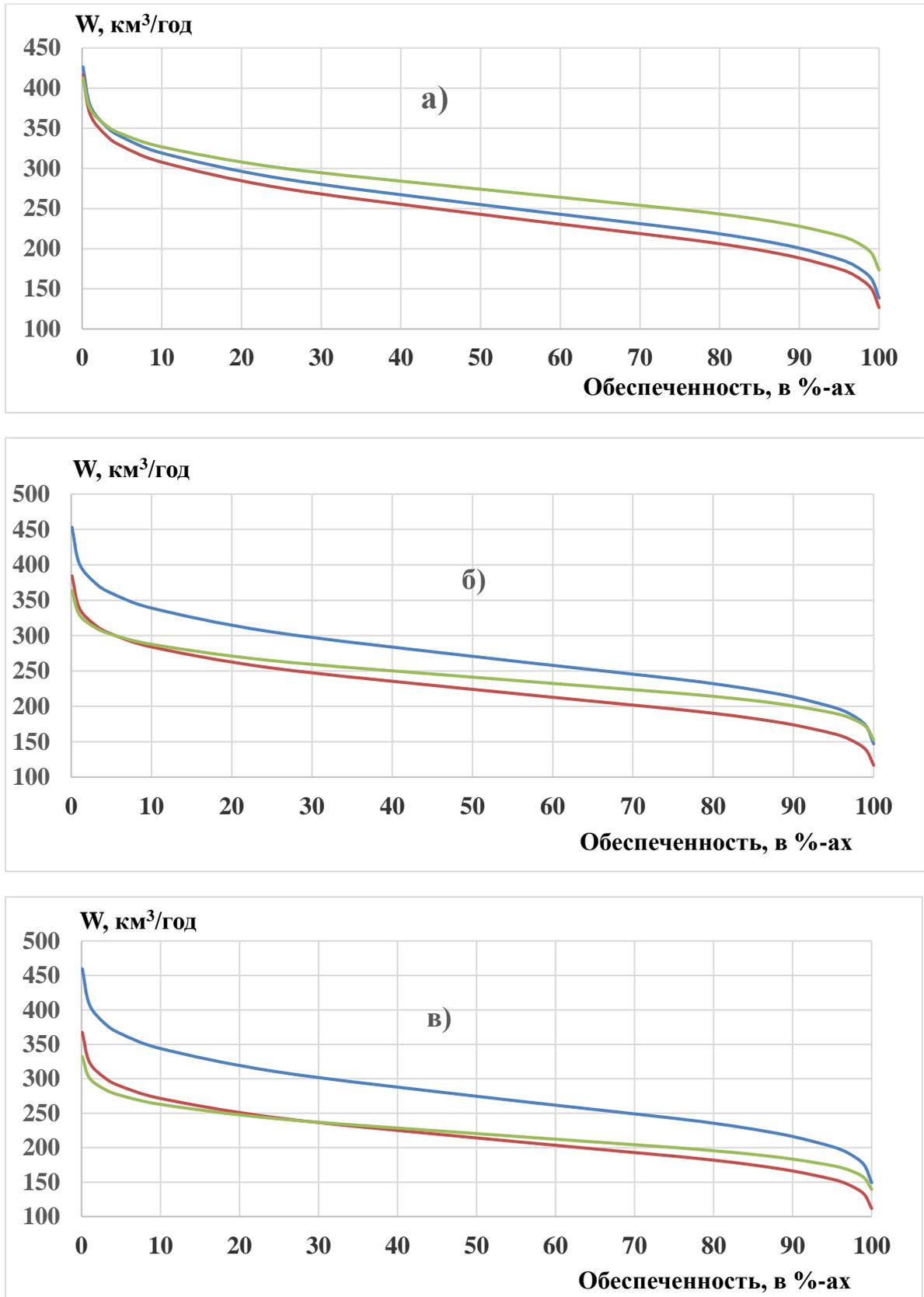


Рисунок 4.10 – Кривые обеспеченности условно-естественного годового притока р. Волги в зоне формирования у г. Волгограда для ряда 2 (1914/1915 – 2020/2021 гг.): а) при современном климате; б) на уровне 2030 г.; в) на уровне 2050 г.

Выводы по четвертой главе.

1. При прогнозе развития гидрологических процессов в речном бассейне Волги, особенно при прогнозе притока речных вод к Волгоградскому гидроузлу в качестве научной базы приняты концептуальные положения о нестационарности, которая исходит из взаимосвязи между глобальным потеплением климата и антропогенными факторами, то есть концепция «антропогенно-обусловленного глобального потепления климата». Прежде всего, исследована возможность учета и оценки нестационарности в многолетних колебаниях речного стока Волги в зоне формирования у Волгограда.

2. Проведено исследование влияния климатических факторов (сценарии климата СМIP3 и СМIP5) на изменение среднеемноголетнего стока (нормы стока) в бассейне реки Волги. Для прогноза изменения статистических параметров речного стока разработаны и применены метод тенденций и динамико-стохастический метод.

3. В результате выполнены исследования, которые позволили осуществить оценку (прогноз) как среднеемноголетних значений притока речных вод бассейна Волги в зоне формирования, так и прогнозных кривых обеспеченности в будущем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены комплексные исследования большого объема данных гидрометеорологической информации и динамико-вероятностных способов, выполнен анализ развития ЭВБ речного бассейна, применительно к бассейну реки Волги в зоне формирования в условиях нестационарности климата. Соответственно получены следующие результаты:

1. Проведенный анализ современных воднобалансовых исследований показывает, что прогноз состояния ЭВБ, особенно суммарного испарения и бассейновых влагозапасов, и их участия в формировании речного стока является одной из сложнейших проблем современной гидрологии. Распределение суммарного испарения и бассейновых влагозапасов зависит от неоднородности рельефа и почвы, радиационного баланса территории, уклона местности, микрорельефа и ряда других факторов. Даже при достаточно густой сети пунктов наблюдений нет возможности учесть весь мозаичный характер строения рельефа водосборной территории речного бассейна и водного режима. С учетом того, что в условиях современного развития теории водного баланса полностью замкнуть уравнение не всегда представляется возможным, возникает необходимость в совершенствовании данной теории до уровня, который обеспечит точность оценки элементов водного баланса. Поэтому наиболее перспективными являются такие методы исследований, которые могут интегрально оценить суммарное испарение и бассейновые влагозапасы, учитывающие природные и антропогенные факторы, которые их определяют.

2. Разработана информационно-аналитическая база данных, содержащая гидрометеорологические характеристики климатических условий речного водосбора, относящиеся к бассейну реки Волги. Она включает годовые и сезонные показатели атмосферных осадков (за период 1891/1892 – 2020/2021 гг., $n=130$ лет), речного стока в зоне его формирования до г. Волгограда (версия наблюдаемого стока; версия восстановленного стока: 1) 1881/1882 – 2020/2021 гг., $n=140$ лет и 2) 1914/1915 – 2020/2021 гг., $n=107$ лет), суммарного испарения с поверхности

речного водосбора (период 1891/1892 – 2020/2021 гг., n=130 лет), изменения бассейновых влагозапасов (период 1891/1892 – 2020/2021 гг., n=130 лет), которые при сработке формируют как речной сток, так и испарение, и наконец, динамику температурного режима подстилающей поверхности речного водосбора с учетом температуры теплого и холодного периода (1901/1902 – 2020/2021 гг., n=120 лет).

3. Предложена методика оценки ЭВБ крупного речного бассейна, которая обеспечивает новый подход к анализу и оценке закономерностей межгодовой и сезонной изменчивости основных составляющих водного баланса и степени их взаимосвязи, исходя из единства процессов круговорота воды в системе «приземной слой атмосферы-речной водосбор-русло реки-замыкающий водоем». Реализация предложенной методики оценки ЭВБ бассейна Волги обеспечила получение достаточно продолжительных временных рядов по основным ЭВБ. В частности, данные по осадкам, притоку речных вод к замыкающим гидроузлам, суммарному испарению с поверхности водосборов, температуре подстилающей поверхности и изменениям бассейновых влагозапасов. Это позволило осуществить ретроспективный сравнительный анализ многолетних колебаний ЭВБ в бассейне Волги за XX век, т.е. выявить свойственные им закономерности отдельных периодов прошлого столетия. Эти закономерности послужили основанием для построения оценочных уравнений связи притока к замыкающим створам от природных (климатических) факторов, которые стали основой для прогноза притока речных вод.

Исследование колебаний атмосферных осадков и стока рек (группировка лет различной водности и разной продолжительности) бассейна Волги указывает на то, что они связаны довольно устойчивыми во времени изменениями средних траекторий движения циклонов. Выделяются три формы циркуляции: западная (W), восточная (E), и меридиональная (C). В целом для Волги выделяются периоды, связанные с выделенной эпохой циркуляции: 1) 1891/1892 – 1928/1929 гг. (W), 2) 1929/1930 – 1939/1940 гг. (E), 1940/1941 – 1948/1949 гг. (C), 1949/1950 – 1972/1973 гг. (E+C), 1973/1974 – 1988/1989 гг. (W+E). При преобладании циркуляции в форме W в бассейне Волги отмечаются повышенные атмосферные осадки (норма – 679

мм/год) и соответственно повышенная водность (норма стока – 190 мм/год (258 км³/год)), при преобладании циркуляции в форме Е наоборот наблюдаются малые атмосферные осадки (норма – 616 мм/год) и малая водность (норма стока – 157 мм/год (214 км³/год)). При преобладании циркуляции в форме С атмосферные осадки и речной сток становятся ближе к климатической норме и, соответственно, составляют 661 мм/год и 190 мм/год (258 км³/год).

4. Проведенный ретроспективный анализ изменения ЭВБ показывает, что явной тенденции увеличения (или уменьшения) в динамике среднемноголетних величин атмосферных осадков не проявляется. В динамике среднемноголетней величины годового стока Волги и стока меженного периода обнаруживается возрастающая тенденция (тренд), а в период половодья тенденция к уменьшению. Основными факторами, способствующими увеличению среднемноголетнего годового стока и стока в межень, являются рост атмосферных осадков и повышение температуры воздуха в бассейне Волги, особенно в зимний период межени. С течением времени в динамике суммарного испарения наблюдается тенденция к уменьшению.

Проведенный анализ распределения атмосферных осадков в контексте формирования речного стока, суммарного испарения и бассейновых влагозапасов демонстрирует, что в периоды с повышенными осадками, такие как 1914/1915 – 1929/1930 гг. и 1978/1979 – 2001/2002 гг., расходуется 29% и 30% осадков на речной сток, в то время как на суммарное испарение уходит 68% и 67% атмосферных осадков. В контрасте, в период с пониженными осадками 1930/1931 – 1945/1946 гг. на формирование речного стока расходуется 25% осадков, а на суммарное испарение – 79 %.

Проведенный анализ изменения среднегодовой температуры приземного слоя воздуха бассейна р. Волги за период 1901/1902 – 2020/2021 гг. показывает, что прирост среднемноголетней температуры приземного воздуха для года в целом составляет 1,9 °С/120 лет, для холодного периода -2,9 °С/120 лет. При этом, выявлены устойчивые нарастающие тенденции (тренды) в многолетних колебаниях температурного режима бассейна Волги за прошлое столетие XX века.

Потепление наиболее ярко обнаружено в холодные периоды, в то время как в теплые периоды наблюдается незначительное похолодание. Выявлены слабые корреляционные связи между речным стоком бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда с температурой приземного воздуха (-0,17), а также между суммарным испарением и температурой приземного воздуха (0,15). Это объясняется сложной пространственной неоднородностью изменения годовой и сезонной температуры воздуха и недоучётом влияния подстилающей поверхности, т.е. влияние ландшафтов, в пределах которых формируются ЭВБ. Однако анализ уровня связи между речным стоком и суммарным испарением с температурой подстилающей поверхности показал хорошую корреляционную связь, соответственно -0,51 и 0,52.

Проведен анализ разностных интегральных кривых ЭВБ бассейна Волги, который позволил выделить характерные периоды в их многолетних колебаниях. В многолетних колебаниях годовых осадков выделяются два периода с осадками ниже среднемноголетних: 1891/1892 – 1911/1912 гг. (n=21 год) со средними атмосферными осадками 660 мм/год, 1929/1930 – 1975/1976 гг. (n=47 лет) со средними атмосферными осадками 638 мм/год. Одновременно выделяются и два периода повышенных осадков: 1912/1913 – 1928/1929 гг. (n=17 лет) со средними атмосферными осадками 701 мм/год и 1976/1977 – 1990/1991 гг. (n=15 лет) со средними осадками 717 мм/год. При исследовании атмосферных осадков холодного и теплого периодов установлено, что существует достаточно явная сопряженность атмосферных осадков холодного периода с годовыми атмосферными осадками, что большую роль играют атмосферные осадки холодного периода.

Проведен анализ разностной интегральной кривой условно-естественного годового стока бассейна Волги у г. Волгограда, который позволил выделить два полных цикла колебаний водности, включающих многоводную и маловодную ветви: первый цикл колебания водности 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. Начиная с 2005/2006

по 2020/2021 гг. в волжском бассейне наблюдается снижение средней водности до 258 км³/год, т.е. рассматриваемый последний 16 лет средний сток волжского бассейна снизился до уровня базового среднемноголетнего стока. По-видимому, начавшийся третий цикл 2005/2006 по 2020/2021 в волжском бассейне сначала наблюдается уменьшение притока речных вод в зоне формирования, после чего его увеличение. Если это подтверждается, можно предположить, что с 2005/2006 года началась фаза снижения в рамках длительного цикла изменения стока Волги.

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 снижения суммарного испарения. 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.

Выявленные неоднородности в структуре ЭВБ бассейна р. Волги, прежде всего, объясняются климатическими факторами. Определённое значение имеют антропогенные факторы, такие как регулирование речного стока, сельскохозяйственные мероприятия, агролесомелиорация, орошение и многое другое. Нельзя не отметить роль таких факторов как рост температуры воздуха. На сток в бассейне Волги оказывают влияние факторы, связанные с подстилающей поверхностью, включая бессточные микро- и макроразливы местности. При оценке однородности гидрологических характеристик значительную роль играют интенсивность снеготаяния и загрязнение снежного покрова отходами.

5. В исследовании были проанализированы возможные варианты использования климатических сценариев, основанных на ряде современных «Моделей общей циркуляции атмосферы и океанов», с целью оценки возможных изменений температуры воздуха и осадков в России, включая бассейн реки Волги, начиная с первой половины XXI века. Рассматривались модели в третьем (CMIP3)

и пятом (СМIP5) оценочном докладе МГЭИК (IPCC,2007). При этом для оценки изменения притока речных вод бассейна Волги в зоне формирования у Волгограда используются сценарии SRESA2, SRESA1B, SRESB1 (СМIP3) и сценарии RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (СМIP5). Рассматривались две разные ситуации в условиях изменяющегося климата: для 2011 – 2030 годов и 2041 – 2060 годов.

Проведенный анализ сценариев возможного изменения глобального климата, и как следствие регионального климата, и его влияние на изменение водных ресурсов бассейна Волги показал следующие результаты. По сценарию A_2 на уровне 2011 – 2030 годов среднемноголетний приток речных вод меняется от 264 – 276 км³/год (рост на 7 – 19 км³/год по сравнению с базовым периодом). На уровне 2031-2050 годов составляет 258 – 280 км³/год (рост на 1,4 – 23 км³/год). По варианту B_1 результаты аналогичные варианту A_2 .

Проведенный анализ результатов сценариев SRES A2, SRES A1B, SRES B1 (СМIP3) показывает, что на уровне 2011-2030 года изменение нормы годового притока бассейна Волги в зоне формирования в различных сценариях отличается незначительно. Если рассмотреть осредненные значения притока речных вод к Волгоградскому гидроузлу по сценариям и функциональным уравнениям по первой версии составляет 265 км³/год, по второй версии составляет 250 км³/год. Сходные результаты получены для уровня 2041-2060 год, по первой версии составляет 267 км³/год, по второй версии составляет 241 км³/год. Данные показывают, что норма притока речных вод к Волгоградскому гидроузлу изменяется в зависимости от версии, по первой версии может возрасти на уровне 2011-2030 года на 8 км³/год и на уровне 2041-2060 года рост на 10 км³/год, по второй версии может снизиться на уровне 2011-2030 года на 7 км³/год и на уровне 2041-2060 года снижение на 16 км³/год.

Проведенный анализ сценариев RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (СМIP5) показал следующие результаты. Согласно сценарию RCP2.6 осредненная по функциональным уравнениям (3.9), (3.12), (3.18) и (3.20) норма годового притока Волги в зоне формирования для версии 1 составляет 264 км³/год на уровне 2011 –

2030 годов, приток речных вод к Волгоградскому гидроузлу повысился на 7 км³/год, а на уровне 2041 – 2060 – 171 км³/год, возросло на 14 км³/год в сравнении с базовым периодом. Для версии 2 изменения будут 246 км³/год на уровне 2011 – 2030 гг., происходит снижение среднемноголетнего притока на 11 км³/год, на уровне 2041 – 2060 гг. будет 239 км³/год, т.е. уменьшение на 18 км³/год по сравнению с базовым периодом. Схожая ситуация имеет место применительно к сценариям RCP4.5 и RCP8.5. Таким образом, исследование изменения среднемноголетнего притока речных вод в бассейне Волги у Волгограда с учетом сценариев CMIP5 выявило, что в зависимости от базового периода могут быть разные результаты. Так например, для версии 1 наблюдается увеличение нормы речного стока на уровне 2011-2030 годов 265 км³/год и 269 км³/год, а для версии 2 наоборот имеет место уменьшение – соответственно 243 км³/год и 238 км³/год по сравнению с базовым периодом.

6. Получены закономерности, которые стали основанием для установления зависимости сезонного (половодья и межени) и годового притока речных вод (R) от атмосферных осадков (P), суммарного испарения (E), эффективных осадков ($P-E$) и температуры подстилающей поверхности (T^*) (3.9) – (3.21). Коэффициенты множественной корреляции (r) для уравнений (3.9) – (3.21) изменяется от 0,80 до 0,90. Это свидетельствует о том, что в зависимостях (3.9) – (3.21) дисперсии годового и сезонного стока составляют более 80%, поэтому используем их для оценки изменения стока Волги при различных сценариях изменения климата.

Установленные закономерности продолжают свое существование и в будущем, ведь процесс развития гидрологических процессов в речном бассейне имеет стационарный характер и это означает, что существует возможность вероятностно-статистического способа прогнозирования характера и параметров стока реки в обозримом будущем. Соответственно этой концепции, возможный диапазон осадков составит 651 – 679 мм/год, аналогично, для притока речных вод в зоне формирования 245 – 269 км³/год, для суммарного испарения 468 – 484 мм/год. Также осуществлена оценка притока бассейна Волги с помощью уравнений

средних 30-летних значений притока Волги у Волгограда от средних величин индекса времени, уравнение (4.13). Исследования уравнений (4.13) показывают, что на уровне 2030 г. ($i_{cp} = 145,5$) норма стока составила 262 км³/год, а на 2050 г. ($i_{cp} = 160,5$) норма стока – 265 км³/год, среднемноголетнее значение базового периода – 257 км³/год. Отсюда можно прийти к выводу, что в первой половине XXI века среднемноголетний приток Волги у Волгограда незначительно увеличивается и со всей вероятностью его значения будут близки к норме за базовый период наблюдения. Следовательно, при принятии этой концепции, вероятностное описание многолетнего колебания речного стока выступает как инструмент получения прогностических оценок. При принятии концепции «антропогенно-обусловленного глобального потепления климата» (нестационарности) необходимо исходить из анализа циклов в колебаниях климатических и гидрологических характеристик, а также однонаправленных тенденций (трендов) в временных рядах речного стока. Такие факторные модели в работе представлены зависимостями, которые связывают речной сток с климатическими факторами (3.9) – (3.30) и функциональными уравнениями, определяющими объем речного стока от фактора времени (t) (4.19) – (4.25).

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. Детерминированная часть обусловлена воздействием геофизических и гелиофизических факторов. В то время как стохастическая составляющая формируется под влиянием множества различных факторов, что проявляется в виде получения функции распределения вероятностей гидрологических характеристик и корреляционных связей между исследуемыми параметрами. Анализ временных рядов, организованных годовыми и сезонными значениями объемов (расходов) притока Волги у Волгограда показывает, что за период с 1881/1882 по 2020/2021 гг. и с 1914/1915 по 2020/2021 гг. существуют различные временные интервалы, которые значительно отличаются

среднемноголетними значениями (нормами). Эти выводы согласуются с ранее выявленными закономерностями, характерными для многолетних колебаний речного стока цикличности. Таким образом, циклы, обнаруженные в многолетних колебаниях речного стока, а также разнонаправленные тренды и их функциональные уравнения стали научной основой для прогноза среднемноголетней величины притока речных вод бассейна Волги в зоне формирования в будущем. В связи с этим предлагается использовать метод экстраполяции (метод тенденций) статистических закономерностей, проявившихся в прошлом, для анализа гидрологических процессов, опираясь на достаточно продолжительные временные ряды гидрологических характеристик $\{W(t) : t \in T\}$.

8. Проведена вероятностная оценка (прогнозирование) годовых объемов (расходов) притока речных вод бассейна Волги к Волгоградскому гидроузлу, которая сводится к решению двух задач: 1) определению условий изменения во времени детерминированной составляющей, т.е. оценки изменения среднемноголетней величины гидрологической характеристики $\{W(t) : t \in T\}$ во времени и ее экстраполяции на период (заблаговременности) прогноза и 2) 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 среднемноголетней величины (нормы) притока речных вод Волги к Волгоградскому гидроузлу во времени (t). Далее, на основе полученных зависимостей и используя метод тенденций осуществлена экстраполяция нормы притока на уровне 2030 и 2050 гг. Для решения второй задачи, для построения прогнозных кривых обеспеченностей, используя трехпараметрическое гамма-распределение С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля с известными прогнозными нормами гидрологической характеристики $\{W(t) : t \in T\}$ и соотношений $C_s = nC_v$ построены ансамбли прогнозных кривых обеспеченностей притока Волги в зоне формирования у Волгограда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авакян, А.Б. Водохранилища / А.Б. Авакян, В.П. Салтанкин, В.А. Шарапов. – М.: Мысль. – 1987. – 325 с.
2. Авакян, А.Б. Наводнения. Концепция защиты / А.Б. Авакян // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2000. - №5. – С. 40 – 46.
3. Авакян, А.Б. Наводнение Мира в последние годы XX в. / А.Б. Авакян, М.Н. Истомина // Водные ресурсы. – 2000. – Т.27. – №5. – С. 517 – 523.
4. Авакян, А.Б. Водохранилища и их воздействия на окружающую среду / А.Б. Авакян, В.П. Салтанкин, В.А. Шарапов. – М.: Наука, 1987. – 296 с.
5. Алехин, Ю.М. Статистические прогнозы в геофизике / Ю.М. Алехин – Л.: ЛГУ, 1963. – 85 с.
6. Андреев, В.Г. Об увязке водных балансов речных бассейнов/ В.Г. Андреев, В.И. Бабкин // Труды ГГИ. – Вып. 200. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – С. 62 – 69.
7. Андреев, В.Г. Внутригодовое распределение речного стока/ В.Г. Андреев – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 308 с.
8. Алексеевский, Н.И. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги / Н.И. Алексеевский, Н.Л. Фролова, М.М. Антонова // Вода: химия и экология. – 2013. – № 4. – С. 3–12.
9. Аполлов, Б.А. Курс гидрологических прогнозов: учебник / Б.А. Аполлов, Г.П. Калинин, В.Д. Комаров. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 419 с.
10. Алехин, Ю.М. Краткосрочные прогнозы стока на равнинных реках / Ю.М. Алехин – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – 266 с.
11. Асарин, А.Е. Колебание стока рек и энергоотдачи ГЭС России / А.Е. Асарин, К.Н. Бестужева // Гидротехническое строительство. – 1997. – № 2. – С. 1 – 6.
12. Бабкин, В.И. Методические основы расчета водных ресурсов и водного баланса территории СССР / В.И. Бабкин и др. // Труды ГГИ. – 1977. – Вып.241. – С. 11 – 28.

13. Бабкин, В.И. Метод водного баланса – научная основа управления водным режимом речных бассейнов/ В.И. Бабкин // Сб. Теория и методы управления ресурсами вод суши. – М.: Наука, 1982. – С. 106 – 117.
14. Бабкин, В.И. Водный баланс речных бассейнов / В.И. Бабкин, В.С. Вуглинский. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 190 с.
15. Бабкин, В.И. Многолетние колебания стока Волги, Оки, Дона, Днепра и методы его прогноза/ В.И. Бабкин // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – М.: Наука, 2008. – №3. – С. 92 – 98.
16. Бабкин, В.И. Современные и ожидаемые до 2015 г. водные ресурсы местного формирования Белгородской, Московской, Воронежской и Тамбовской областей/ В.И. Бабкин // Метеорология и гидрология. – 2008. – №3. – С. 96 – 203.
17. Бабкин, В.И. Динамика стока рек Центрального района России / В.И. Бабкин, В.Н. Воробьев, Н.П. Смирнов// Метеорология и гидрология. – 2007. – №9. – С. 80 – 83.
18. Бабкин, В.И. О роли циклонической деятельности в формировании стока Волги, Дона и Днепра / В.И. Бабкин, А.Н. Постников // Водные ресурсы. – 2000. – Том 27. – №1. – С. 106 – 108.
19. Бабкин, В.И. Влияние циклонической активности на сток Волги/ В.И. Бабкин, А.Н. Постников, С.В. Смыслов // Труды ГГИ. – 1992. – Вып. 360. – С.48 – 57.
20. Бахтиаров, В.А. Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты/ В.А. Бахтиаров В.А. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 430 с.
21. Бейтс, Б.К., Изменение климата и водные ресурсы. Технический документ Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) / Б.К. Бейтс, З.В. Кундцевич, У. Саохон (ред.). – Женева, 2008. – 228 с.
22. Бефани, Н.Ф. Прогнозирование дождевых паводков на основе территориально-общих зависимостей / Н.Ф. Бефани. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 184 с.
23. Блохинов, Е.Г. Распределения вероятностей величин речного стока/ Е.Г. Блохинов. – М.: Наука, 1974. – 169 с.

24. Болгов, М.В. Марковские процессы в гидрологии/ М.В. Болгов, И.О. Сарманов, О.В Сарманов. – М.: Ин-т водных проблем РАН. – 2009. – 210 с.
25. Болгов, М.В. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения / М.В. Болгов, В.М. Мишон, Н.И. Синцова. – М.: Наука, 2005. – 317 с.
26. Брикнер, Э.А. Баланс круговорота воды на земле / Э.А. Брикнер. – М.: Книга по требованию. – 2014. – 18 с.
27. Будыко, М.И. Тепловой баланс земной поверхности / М.И. Будыко. – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – 255 с.
28. Будыко, М.И. Испарение в естественных условиях / М.И. Будыко. – Л.: Гидрометеиздат, 1948. – 136 с.
29. Будыко, М.И. Климат в прошлом и будущем / М.И. Будыко. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 352 с.
30. Будыко, М.И. Климат и жизнь / М.И. Будыко. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 472 с.
31. Будаговский, А.И. Испарения почвенной влаги / А.И. Будаговский. – М.: Наука, 1964. – 243 с.
32. Бузин, В. А. Ледовые процессы и явления на реках и водохранилищах. Методы математического моделирования и опыт их реализации для практических целей. Обзор современного состояния проблемы / В.А. Бузин, А.Т. Зиновьев // Институт водных и экологических проблем СО РАН. – Барнаул. – 2009. - 169 с.
33. Булавко, А.Г. Водный баланс речных водосборов / А.Г. Булавко. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 304 с.
34. Великанов, М.А. Водный баланс суши / М. А. Великанов. – Л.: Гидрометеиздат, 1940. – 180 с.
35. Великанов, М.А. Гидрология суши / М. А. Великанов. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 402 с.
36. Великанов, А. Л. Регулирование стока как задача теории управления водными ресурсами / А. Л. Великанов // Водные ресурсы. – 1999. – Т. 26. – № 5. – С. 583-593.

37. Великанов, А.Л. Моделирование процессов функционирования водохозяйственных систем / А. Л. Великанов, Д.Н. Коробова, В.И. Пойзнер. – М.: Наука, 1983. – 105 с.
38. Вершинина, Л.К. Анализ зависимости объема весеннего стока рек в бассейне р. Дон от обуславливающих факторов / Л.К. Вершинина // Труды ГГИ. – 1974. – Вып. 218. – С. 45 – 71.
39. Викулина, З.А. Водный баланс озёр и водохранилищ Советского Союза / З.А. Викулина. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 176 с.
40. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. – СПб: Государственный гидрологический институт. – 2008. – 600 с.
41. Вода России. Водно-ресурсный потенциал / Под ред. А.М. Черняева // ФГУП Рос НИИВХ. – Екатеринбург: Изд. «Аква-Пресс», 2000. – 420 с.
42. Воейков, А.И. Климаты земного шара, в особенности России / А.И. Воейков; Под ред. акад. А. А. Григорьева // В кн. Избранные сочинения. – М.; Л.: Изд-во и 2-я тип. Изд-ва Акад. Наук СССР. – 1948. – Т.1. – 751 с.
43. Воейков, А.И. Влияние снеговой поверхности на климат / А.И. Воейков; Под ред. акад. А. А. Григорьева // Избранные сочинения. – М.; Л.: Изд-во и 2-я тип. Изд-ва Акад. Наук СССР. – 1949. – Т.2. – 225 с.
44. Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза / Гос. гидрологический ин-т. – Л.: Гидрометеиздат, 1967 – 200 с.
45. Воропаев, Г.В. Проблемы управления водными ресурсами Арало-Каспийского региона / Г.В. Воропаев, Г.Х. Исмайлов, В.М. Федоров. – М.: Наука, 2003. – 413 с.
46. Воропаев, Г.В. Моделирование водохозяйственных систем аридной зоны СССР / Г.В. Воропаев, Г.Х. Исмайлов, В.М. Федоров. – М.: Наука, 1984. – 312 с.
47. Воропаев, Г.В. Развитие водохозяйственных систем. Методы анализа и оценки эффективности их функционирования / Г.В. Воропаев, Г.Х. Исмайлов, В.М. Федоров. – М.: Наука, 1989. – 295 с.

48. Временные методические указания управлениям Гидрометслужбы по составлению русловых водных балансов / Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Гос. гидрол. ин-т – Л.: Б. и., 1972 – 44 с.
49. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствия на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет, 2014. – 1004 с.
50. Вуглинский, В.С. Водные ресурсы и водный баланс водохранилищ СССР / В.С. Вуглинский. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 224 с.
51. Высоцкий, Г.Н. О гидрологическом и метеорологическом влиянии лесов / Г.Н. Высоцкий. – М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. – 112 с.
52. Высоцкий, Г.Н. Степи Европейской России / Г.Н. Высоцкий // В кн.: Полная энциклопедия русского сельского хозяйства. – СПб, 1905. Т.9. – С.398 – 443.
53. Гейнц, Е.А. Водоносность бассейна верховьев Оки в связи с осадками / Е.А. Гейнц. – СПб. – 1903. – 38 с.
54. Гельфан, А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока / А.Н. Гельфан. – М.: Наука, 2007. – 279 с.
55. Георгиевский, Ю.М. Гидрологические прогнозы / Ю.М. Георгиевский, С.В. Шаночкин. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2007. – 436 с.
56. Гидрологические основы гидроэнергетики / Под ред. А.Ш. Резниковского. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 263 с.
57. Глушков, В.Г. Водный баланс и прогнозы / В.Г. Глушков // В кн.: Вопросы теории и методы гидрологических исследований. – М., 1961. – С. 90 – 98.
58. Голубев, Н.П. Суммарное испарение в бассейне Волги и его изменчивость / Н.П. Голубев, Н.А. Сперанская, К.В. Цыценко // Метеорология и гидрология. – 2003. – №7. – С. 89 – 99.
59. Данилов-Данильян, В.И., Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования / В.И. Данилов-Данильян, И.Л. Хранович – М.: Научный мир, 2010. - 232 с.
60. Демин, А.П. Водопотребление и водоотведение в бассейне Волги / А.П. Демин, Г.Х. Исмаилов // Водные ресурсы, 2003. – Т.30. – №3. – С. 366 – 380.

61. Дмитриева, В.А. Географо-гидрологическая оценка водных ресурсов субъекта Российской Федерации в условиях меняющегося климата и хозяйственной деятельности: на примере Воронежской области. Диссертация доктора географ. наук: 25.00.27 / Дмитриева Вера Александровна. – Воронеж, 2012. – 350 с.
62. Добровольский, С.Г. Глобальные изменения речного стока / С.Г. Добровольский – М.: ГЕОС, 2011. – 659 с.
63. Добровольский, С.Г. Климатические изменения в системе «Гидросфере-Атмосфере» / С.Г. Добровольский. – М.: ГЕОС, 2002. – 232 с.
64. Добровольский, С.Г. Наводнения Мира / С.Г. Добровольский, М.Н. Истомина – М.: ГЕОС, 2006. – 256 с.
65. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (РОСГИДРОМЕТ). – Москва, 2021. – 104 с.
66. Евстигнеев, В.М. Речной сток и гидрологические расчеты / В.М. Евстигнеев. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 304 с.
67. Закономерности гидрологических процессов. / Под ред. Н. И. Алексеевского. – М.: ГЕОС, 2012. – 733 с.
68. Иванов, Е.Г. К оценке влияния изменения климата на формирование водных ресурсов и ирригационного водопотребления в бассейне р. Сырдарьи / Е.Г. Иванов, Г.Х. Исмайылов, В.М. Федоров // Водные ресурсы, 1992. – №5. – С. 18 – 31.
69. Изменение климата и водные ресурсы Технический документ Межправительственный группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). – Женева, 2008. – 228 с.
70. Исмайылов, Г.Х. Исследование закономерностей формирования возвратных вод в бассейне Сырдарьи / Г.Х. Исмайылов, В.М. Федоров // Водные ресурсы, 1981. – №4. – С. 5 – 20.
71. Исмайылов, Г.Х. Гидрология в природопользовании. Часть 3. Инженерная гидрология: Учебник / Г.Х. Исмайылов, И.В. Прошляков, Н.В. Муращенко. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2018. – 252 с.

72. Исмайылов, Г.Х. Анализ и оценка влияния природных и антропогенных факторов на водные ресурсы бассейна Волги: суммарные затраты водных ресурсов / Г.Х. Исмайылов, А.П. Демин, В.М. Федоров // Водные ресурсы, 1997. – Т. 24. – №2. – С. 234-240.
73. Исмайылов, Г.Х. Межгодовая изменчивость и взаимосвязь элементов водного баланса бассейна р. Волги / Г.Х. Исмайылов, В.М. Федоров // Водные ресурсы, 2008. – Т.35. – №3. – С. 259 – 276.
74. Исмайылов, Г.Х. Оценка возможных антропогенных изменений стока р. Сырдарьи на основе математической модели / Г.Х. Исмайылов, В.М. Федоров, С.Д. Садати Нежад // Водные ресурсы, 2007. – Т.34. – №4. – С. 45 – 63.
75. Исмайылов, Г.Х. Методика оценки сложноформируемых элементов водного баланса (суммарного испарения и влагозапасов) речного бассейна / Г.Х. Исмайылов, Н.В. Муращенко, И.Г. Исмайылова // Природообустройство. – М.: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2020. – №5. – С. 88-95.
76. Исмайылов, Г.Х. Ретроспективная оценка незарегулированных боковых приточностей Куйбышевского (ныне Жигулевская ГЭС) гидроузла бассейна р. Волги / Г.Х. Исмайылов, Н.В. Муращенко, И.Г. Исмайылова // Природообустройство. – М.: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2021. – №1. – С. 87-99.
77. Исмайылов, Г.Х. Методика анализа функционирования сложных водохозяйственных систем на примере Волжско-Камского каскада гидроузлов / Г.Х. Исмайылов, А.В. Перминов, И.Г. Исмайылова // Природообустройство. – М.: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2021. – №2. – С. 131-140.
78. Исмайылов, Г.Х. Оценка многолетних изменений качественных характеристик стока реки Оки / Г.Х. Исмайылов, Н.В. Муращенко, И.Г. Исмайылова // Природообустройство. – М.: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2021. – №5. – С. 98-104.
79. Исмайылов, Г.Х. Мировой водный баланс и водные ресурсы земли, водный кадастр и мониторинг водных объектов / Г.Х. Исмайылов, А.В. Перминов. – М.: Изд-во ФГБОУ ВПО МГУП, 2013. – 324 с.

80. Исмайылов, Г.Х. Оценка цикличности многолетних колебаний годового стока реки Дон / Г.Х. Исмайылов, Н.В. Муращенкова // Природообустройство. – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2010. – №1. – С. 84-88.
81. Исмайылов, Г.Х. Пространственно-временные закономерности изменчивости годового водного баланса реки Волги / Г.Х. Исмайылов, В.М. Федоров // Природообустройство. – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2011. – №2. – С. 57-68.
82. Исмайылов, Г.Х. Прогноз состояния пресноводных ресурсов России в связи с глобальными и региональными изменениями / Г.Х. Исмайылов, В.М. Федоров // Природообустройство. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2013. – №1. – С. 60-64.
83. Исмайылов, Г.Х. Оценка изменения и взаимосвязь элементов водного баланса бассейна реки Волги в условиях изменения климата / Г.Х. Исмайылов, Н.В. Муращенкова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 2015. – №5. – С. 4 – 7.
84. Исмайылова, И.Г. Формирование временных рядов гидрометеорологических информации для оценки изменчивости элементов водного баланса / И.Г. Исмайылова, Л.Д. Раткович // Гидротехническое строительство. – М.: Энергопрогресс, 2023. – №11. – С. 20 – 26.
85. Исмайылова, И.Г. Учет и оценка нестационарности при управлении водными ресурсами речного стока / И.Г. Исмайылова, Г.Х. Исмайылов, Н.В. Муращенкова // Природообустройство. – М.: ФГБУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023. – №1. – С. 82 – 88.
86. Исмайылова, И.Г. Имитационная модель для анализа и оценки многолетнего и сезонного колебания элементов водного баланса бассейна реки Волги/ И.Г. Исмайылова, Л.Д. Раткович // Природообустройство. – М.: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023. – №5. – С. 103 – 110.
87. Исмайылова, И.Г. Исследование многолетней изменчивости элементов водного баланса речного бассейна в современном климате / И.Г. Исмайылова // Природообустройство, 2024. – №2. – С. 69 – 78.

88. Исмайылова, И.Г. Анализ и прогноз речных вод в зоне формирования стока реки Волги методом тенденций / И.Г. Исмайылова, Г.Х. Исмайылов, Л.Д. Раткович // *Природообустройство*, 2022. – №2. – С. 69 – 78.
89. Исмайылова, И.Г. Обоснование развития гидрологических процессов с использованием динамико-стохастического подхода / И.Г. Исмайылова и др. // *Природообустройство*. – М.: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2022. – №5. – С. 74 – 82.
90. Исмайылова, И.Г. Моделирование элементов водного баланса р. Волги для создания информационно-аналитической гидрометеорологической базы данных / И.Г. Исмайылова. – Уфа: Изд. НИЦ Вестник науки, 2023. – С. 23 – 38.
91. Калинин, Г.П. Проблемы глобальной гидрологии / Г.П. Калинин. – Л.: Гидрометеиздат, 1968 – 377 с.
92. Калинин, Г.П. Космические методы в гидрологии/ Г.П. Калинин, Ю.В. Курилова, П.А. Колосов. – Л.: Гидрометеиздат, 1977 – 184 с.
93. Картвелишвили, Н.А. Стохастическая гидрология / Н.А. Картвелишвили. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 168 с.
94. Кислов, А.В. Моделирование климатических условий Восточно – Европейской равнины и вариации стока р. Волги в эпоху позднеплейстоценового похолодания / А.В. Кислов, П.А. Торопов // *Вестник Московского университета*. – Сер. 5. – География. – 2006. – № 2. – С. 13 – 17.
95. Кислов, А.В. Прогноз климатической ресурсобеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века / А.В. Кислов, В.М. Евстигнеев, С.М. Малхазова и др. – М.: МАКС ПРЕСС, 2008. – 292 с.
96. Кислов, А.В. Модели климата для географических исследований (качества результатов моделирования) / А.В. Кислов // *Вестник Московского университета*. – Сер.5. – География. – 2001. – №1. – С. 3 – 10.
97. Кокорин, А.О. Изменение климата: обзор Пятого оценочного доклада МГЭИК / А.О. Кокорин. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2014. – 80 с.
98. Константинов, А.Р. Испарение в природе / А.Р. Константинов. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 568 с.

99. Кондратович, К.В. Антропогенные геофизические и космические факторы изменения циркуляционных эпох и уровня Каспия / К.В. Кондратович // Водные ресурсы. – 1994. – Т.21. – №6. – С. 620 – 630.
100. Коронкевич, Н.И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения / Н.И. Коронкевич. – М.: Наука, 1990 – 205 с.
101. Коронкевич, Н.И. Оценка антропогенных воздействий на водные ресурсы России / Н.И. Коронкевич, Е.А. Барабанова, А.Г. Георгиади // Вестник Российской Академии наук. – 2019. – том 89. – №6. – С. 603 – 614.
102. Крестовский, О.И. Водный баланс водосборов ВНИГЛ / О.И. Крестовский //Труды ГГИ. – 1969. – Вып. 165. – С. 3 – 71.
103. Крицкий, С.Н. Водохозяйственные расчеты / С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель. – Л: Гидрометеиздат, 1952. – 392 с.
104. Крицкий, С.Н. Гидрологические основы управления речным стоком / С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель. – М.: Наука, 1981 – 255 с.
105. Крицкий, С.Н. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами / С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель. – М.: Наука, 1982 – 271 с.
106. Кузин, П.С. Испарение с суши на территории СССР / П.С. Кузин // Труды ГГИ. – 1950. – Вып. 26(80). – С. 118 – 127.
107. Кузьмин, П.П. Испарения с поверхности снежного покрова / П.П. Кузьмин // Труды ГГИ. – 1953. – Вып.41(95). – С. 34 – 52.
108. Кузьмин, П.П. Формирование снежного покрова и методы определения снеготпасов / П.П. Кузьмин. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 171 с.
109. Кузнецов, В.И. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов / В.И. Кузнецов, В.С. Голубев, Т.Г. Федорова. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 83 с.
110. Кучмент, Л.С. Динамика-стохастические модели формирования речного стока / Л.С. Кучмент, А.Н. Гельфан. – М.: Наука, 1993. – 103 с.
111. Лаукс, Д.П. Планирование и анализ водохозяйственных систем / Д.П. Лаукс // Пер. с англ. под ред. Г.В. Воропаева, А.Л. Великанова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 400 с.

112. Львович, М.И. Человек и воды: Преобразование водного баланса и речного стока / М.И. Львович – М.: Географгиз, 1963. – 568 с.
113. Львович, М.И. Водный баланс СССР и его преобразование / М.И. Львович (отв. ред.). – М.: Наука, 1969. – 337 с.
114. Малинин, В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации / В.Н. Малинин. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2008. – 408 с.
115. Малинин, В.Н. Проблемы прогнозы уровня Каспийского моря / В.Н. Малинин. – С. Петербург, 1994. – 160 с.
116. Методы изучения и расчета водного баланса. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 398 с.
117. Методы изучения гидрологического режима водных объектов. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 391 с.
118. Мезенцев, В.С. Увлажненность Западно-Сибирской равнины / В.С. Мезенцев, И.В. Карнацевич. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 168 с.
119. Методическое указания управлениям Гидрометслужбы №89. Составление водных балансов речных бассейнов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974 – 96 с.
120. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. – Санкт-Петербург: Нестор-История, 2010. – 160 с.
121. Методическое указания управления Гидрометслужбы №90. Составление русловых водных балансов. – Л.: Гидрометеиздат, 1977 – 103 с.
122. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. – Л.: Гидрометеиздат, 1974 – 637 с.
123. Музылев, С.В. Стохастические модели в инженерной гидрологии / С.В. Музылев, В.Е. Привальский, Д.Я. Раткович. – М.: Наука, 1982. – 184 с.
124. Назаров, Н.А. Модель и алгоритм расчета формирования речного стока на лесном водосборе / Н.А. Назаров, А.А. Сиринов. – М.: Междувед. геофиз. ком., 1988. – 107 с.

125. Научно-прикладной справочник: Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях. // Под ред. М.Л. Маркова. – Санкт-Петербург: ООО «РИАЛ», 2021. – 202 с.
126. Обзор зарубежных работ по применению математических методов и ЭВМ в водном хозяйстве / В.А. Владимиров и др. – М.: ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1983. – 73 с.
127. Ольдекоп, Э.М. Об испарении с поверхности речных бассейнов / Э.М. Ольдекоп. – Юрьев: тип. Эд. Бергмана, 1911. – 209 с.
128. Оппоков, Е.В. Осадки, сток и испарение в бассейне Днепра выше Киева (по новейшим данным) / Е.В. Оппоков – Исследование рек СССР. – 1935. – Вып. 7. – С. 38 – 54.
129. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-203. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.
130. Пряжинская, В.Г. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами / В.Г. Пряжинская, Д.М. Ярошевский, Л.К. Левит-Гуревич. – М.: Физматлит, 2002. – 196 с.
131. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик / Сост. А.В. Рождественский, В.Е. Водогретский и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 448 с.
132. Раткович, Д.Я. Многолетние колебания речного стока / Д.Я. Раткович. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 255 с.
133. Раткович, Л.Д. Моделирование взаимозависимых гидрологических рядов / Л.Д. Раткович // Природообустройство. – №2. – 2012. – С. 55-59.
134. Раткович, Л.Д. Зависимость комплексной гарантированной водоотдачи от регулирующего объема водохранилища / Л.Д. Раткович и др. // Природообустройство. – М.: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2022. – №1. – С. 54-62.
135. Раткович, Д.Я. Стохастические модели колебаний составляющих водного баланса речного бассейна / Д.Я. Раткович, М.В. Болгов. – М.: ИВП РАН, 1997. – 262 с.

136. Раткович, Д.Я. Гидрологические основы водообеспечения / Д.Я. Раткович. – М.: ИВП РАН, 1993. – 428 с.
137. Режим влагообеспеченности и условия гидромелиораций степного края //Под. ред. проф. В.С. Мезенцева. – М.: Колос, 1974. – 239 с.
138. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 96 с.
139. Резниковский, А.Ш. Диспетчерские правила управления режимами водохранилищ / А.Ш. Резниковский, М.И. Рубинштейн. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 120 с.
140. Репрезентативные и экспериментальные бассейны. Международное руководство по исследованиям и практике. //Под ред. К. Тоубса и В. Урываева. – Л.: Гидрометеиздат, 1971 – 428 с.
141. Рождественский, А.В. Статистические методы в гидрологии / А.В. Рождественский, А.И. Чеботарев. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 424 с.
142. Рубинова, Ф.Э. Влияние водных мелиораций на сток и гидрохимический режим рек бассейна Аральского моря / Ф.Э. Рубинова // Тр. САРНИГМИ, 1987. – Вып. 124 (205). – 159 с.
143. Саваренский, А.Д. Регулирование речного стока водохранилищами / А.Д. Саваренский. – М.: Изд. АН СССР, 1951. – 251 с.
144. Сванидзе, Г.Г. Математическое моделирование гидрологических рядов: Для водноэнерг. и водохоз. расчетов / Г.Г. Сванидзе – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 296 с.
145. Семёнов, С.М. Гидрологические прогнозы в системе мониторинга подземных вод / С.М. Семёнов. – М.: Наука, 2005. – 131с.
146. Смирнов, Н.П. Водный баланс атмосферы как гидрологическая задача / Н.П. Смирнов, В.Н. Малинин. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 200 с.
147. Соколовский, Д.Л. Речной сток / Д.Л. Соколовский. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 536 с.
148. Федосеев, И.А. Развитие гидрологии суши в России / И.А. Федосеев. – М.: Изд. АН СССР, 1960. – 302 с.

149. Федосеев, И.А. Развитие знаний о происхождении, количестве и круговороте воды на Земле / И.А. Федосеев. – М.: Наука, 1967. – 302 с.
150. Фролова, Н.Л. Естественная зарегулированности стока рек бассейна Волги в условиях меняющегося климата / Н.Л. Фролова, С.А. Агафонова, Д.П. Нестеренко // Водное хозяйство России, 2013. №6. – С. 32-49.
151. Фролов, А. В. Оценка статистических характеристик многолетних колебаний испарения с крупных речных водосборов / А. В. Фролов // Доклады Академии наук, 2014. – Т. 458. – № 3. – С. 345-348.
152. Фролов, А. В. Моделирование негауссова векторного процесса в приложении к гидрологии / А. В. Фролов, Т. Ю. Выручалкина, И. В. Соломонова // Водные ресурсы, 2014. – Т. 41. – № 6. – С. 559-564.
153. Харченко, С.И. Гидрология орошаемых земель / С.И. Харченко. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 372 с.
154. Харченко, С.И. Тепловоднобалансовый метод расчета водного режима (орошения и осушения) почв в Нечерноземной зоны / С.И. Харченко // Труды ГГИ, 1978. – Вып.251. – С. 3-25.
155. Харченко, С.И. Управление водным режимом на мелиорируемых землях в Нечерноземной зоне / С.И. Харченко. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 239 с.
156. Христофоров, А.В. Надежность расчетов речного стока / А.В. Христофоров. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 166 с.
157. Христофоров, А.В. Теория случайных процессов в гидрологии / А.В. Христофоров. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 139 с.
158. Хромов, С.П. Метеорология и климатология. Учебник, 4-е изд. / С.П. Хромов, М.А. Петросянц. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 520 с.
159. Цветков, Е.В. Оптимальные режимы гидроэлектростанций в энергетических системах / Е.В. Цветков, Т.М. Алябышева, Л.Г. Парфенов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 304 с.
160. Шебеко, В.Ф. Гидрологический режим осушаемых территорий / В.Ф. Шебеко. – Минск: Урожай, 1970. – 299 с.

161. Шикломанов И.А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток / И.А. Шикломанов. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 334 с.
162. Шикломанов И.А. Антропогенные изменения водности рек / И.А. Шикломанов. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 302 с.
163. Широкова, В.А. Основатель системно-генетического подхода в гидрологии / В.А. Широкова, В.Г. Глушков. // История науки и техники. Материалы международно-научной конференции, 2019. – 427 – 430 с.
164. Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и Западной Сибири / Под. ред. Касимова и А.В. Кислова. – М.: МАКС Пресс, 2011. – 493 с.
165. Яглом А.М. Корреляционная теория стационарных случайных функций с примерами из метеорологии / А.М. Яглом. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 282 с.
166. Bolgov, M. Bayesian Decision for Low Flow Evaluation in Non-Stationary Conditions / M. Bolgov, E. Korobkina, I. Filippova // The Grand Challenges Facing Hydrology in the 21st Century. Dooge Nash International Symposium. – 2014. – Dublin, Ireland. – P. 65-74.
167. Gilman, K. Water balance of wetland areas / K. Gilman // Conference on «The balance of water – present and future», Proceedings AGMET Group (Ireland) & Agricultural Group of the Meteorological Society (U.K.). – Dublin. – 1994. – P.123-142.
168. Hazen, A. Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply / A. Hazen. – Trans. ASCE, New York, 1914. – P. 1547 – 1550.
169. Huaxia, Yao Determining spatially – distributed annual water balances for ungauged locations on Shikoku Island, Japan: a comparison of two interpolators / Yao Huaxia, Irena F. Creed // Water and Energy Abstracts. – Central Board of Irrigation and Power. – 2005. – P. 39 – 39.
170. Penk, F. Versuch eine Klimaklassifikation auf Physiogeographische Grundlage / F. Penk. – Ber K Preuss Akad. Wiss. Phys-Math Kil. – 1910. – №12. – P. 236 – 246.
171. Shiklomanov, I.A. Water resources as a challenge of twenty-first century / I.A. Shiklomanov and others // Tenth IMO Lecture. World Meteorological Organization (WMO). – Geneva. – №959. – 2003. – 152 p.

172. Sudler, C. Storage required for the regulation of streamflow / C. Sudler. – Trans. ASCE. – 1927. – P. 622 – 660.
173. The operation of multiple Reservoir System // The Operation of Multiple Reservoir Systems. – Laxenburg, Austria: JJASA, 1982. – 402 p.
174. Xu, C.-Y. Regional water balance modelling in the NOPEX area: regionalization of model parameters and hydrologic variables / C.-Y. Xu, J. Seibert and S. Halldin. – Geophysicae, Part II: Oceans, Atmosphere, Hydrology and Nonlinear Geophysics – 1995. – 348 p.
175. Xu, C.-Y. Estimation of parameters of a conceptual water balance model for ungauged catchments / C.-Y. Xu // Water resources management, 1999. – № 13. – P.358 – 368.
176. Yeyjevitch, V. Fluctuations of wet and dry years. Part II: Analysis by serial correlation / V. Yeyjevitch. – Denver, CO: Colorado State University. – 1964. – 61 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ


RU2024620214

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
**ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ, ОХРАНЯЕМОЙ
АВТОРСКИМИ ПРАВАМИ**

Номер регистрации (свидетельства): 2024620214 Дата регистрации: 16.01.2024 Номер и дата поступления заявки: 2023624514 05.12.2023 Дата публикации и номер бюллетеня: 16.01.2024 Бюл. № 1 Контактные реквизиты: Snezkina@rgau-msha.ru	Автор(ы): Исмайлова Ирина Габилловна (RU) Правообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева) (RU)
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Название базы данных:
«Формирование временных рядов гидрометеорологической информации для оценки изменчивости элементов водного баланса»

Реферат:

Назначение базы данных - хранение информации о методике расчета водного баланса речного бассейна, о длительных временных рядах ее суммарного испарения, а также изменениях бассейновых влагозапасов применительно к бассейну реки Волги в зоне формирования до города Волгоград. Материал может быть использован для повышения профессиональной квалификации в области гидрологических и водохозяйственных расчетов. Пользователями базы данных могут быть студенты и преподаватели по направлению подготовки «Природообустройство и водопользование», на уровне бакалавриата и магистратуры, специалисты, занимающиеся обоснованием использования водных ресурсов в различных отраслях экономики и прежде всего в сельском хозяйстве.

Вид и версия системы управления базой данных: PowerPoint 2007 и выше

Объем базы данных: 29 МБ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б**УТВЕРЖДАЮ:**Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева

 М.И. Селионова
 « 18 » 10 2024 г.
СПРАВКА

об использовании результатов научно-исследовательской работы (внедрении)
в учебном процессе

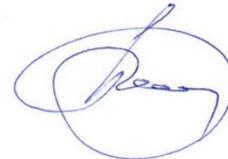
Дана соискателю кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами **Исмайловой Ирине Габилловне** в том, что разработанная ею методика комплексной оценки элементов водного баланса речного бассейна в условиях глобальных и региональных изменений климата и созданная информационно-аналитическая база гидрометеорологических показателей бассейна Волги внедрена в учебный процесс и используется для студентов направления 05.03.06, направленности – Агрэкология и экологически безопасная продукция, Экология и устойчивое природопользование в лекционном курсе и практических занятиях дисциплины Б1.О.26 «Учение о гидросфере» и магистрантами кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами направления 20.04.02, направленности – Цифровые системы мониторинга безопасности водохозяйственных объектов в АПК.

И.о. директора института мелиорации,
водного хозяйства и строительства
имени А.Н. Костякова, к.т.н., доцент



Д.М. Бенин

И.о. заведующего кафедрой гидравлики,
гидрологии и управления водными
ресурсами, к.т.н., доцент



А.В. Перминов