

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский государственный национальный исследовательский университет»



На правах рукописи

Механошина Екатерина Владимировна

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВНУТРИГОДОВОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТОКА РЕК ВЕРХНЕЙ И СРЕДНЕЙ КАМЫ В ГОДЫ
РАЗНОЙ ВОДНОСТИ**

Специальность 1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
кандидат географических наук,
К.Д. Микова

Пермь, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ФОРМИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА	12
1.1. Основные факторы формирования речного стока	12
1.1.1 Факторы атмосферы	14
1.1.2 Факторы речного бассейна	18
1.2 Изученность речного стока и его внутригодового распределения.....	22
ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОСБОРА ВЕРХНЕЙ И СРЕДНЕЙ КАМЫ, ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	41
2.1. Физико-географическая характеристика исследуемой территории	41
2.2. Особенности водного режима рек водосбора.....	49
2.3. Характеристика исходных данных	51
2.4. Подход к исследованию внутригодового распределения стока рек в разные по водности годы.....	56
ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ ВНУТРИГОДОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТОКА РЕК ВОДОСБОРА ВЕРХНЕЙ И СРЕДНЕЙ КАМЫ В РАЗНЫЕ ПО ВОДНОСТИ ГОДЫ.....	65
3.1. Типизация гидрографов рек и их пространственное распределение	65
3.2. Районирование территории водосбора Верхней и Средней Камы по внутригодовому распределению речного стока	70
3.3. Оценка многолетнего изменения внутригодового распределения стока рек.....	80
3.4. Влияние естественной зарегулированности речного стока на его внутригодовое распределение	90
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ В РАЗНЫЕ ПО ВОДНОСТИ ГОДЫ	100
4.1 Особенности формирования весеннего половодья на реках Верхней и Средней Камы в разные по водности годы.....	100
4.1.1 Оценка влияния морфометрических характеристик водосбора рек на продолжительность весеннего половодья	103

4.2 Оценка влияния основных факторов на формирование стока весеннего половодья.....	109
4.3 О возможности комплексного учета основных факторов на формирование стока весеннего половодья.....	112
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ЗАБЛАГОВРЕМЕННОГО РАСЧЕТА ВОДНОСТИ ГОДА НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИТОКА ВОДЫ ЗА ВЕСЕННЕЕ ПОЛОВОДЬЕ.....	117
5.1. Характеристика среднемесячного и годового притока воды	118
5.2. Разработка алгоритма расчета притока в период весеннего половодья	126
5.3. Оценка качества алгоритма расчета.....	147
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	150
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	152

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Внутригодовое распределение стока (ВГРС) – это распределение величины стока по календарным периодам или сезонам года, которое служит интегральным показателем гидрологического режима водных объектов, определяющим возможности и риски водопользования, предотвращения или ослабления экстремальных гидрологических явлений, выполнение гидрологических расчетов при проектировании и строительстве гидротехнических и промышленных объектов.

В условиях современных климатических изменений, особенно в годы экстремальной водности, исследование закономерностей формирования ВГРС является важным условием для устойчивого и рационального управления водными ресурсами, особенно крупных водохозяйственных систем, к которым относится территория Верхней и Средней Камы (водосбор Воткинского водохранилища).

Особенности физико-географического расположения исследуемой территории, а именно хорошо выраженная широтная зональность на равнине и вертикальная поясность в горах Урала, определяют сложное взаимодействие факторов формирования ВГРС, в частности, на водосборах средних и малых рек.

Наибольшую научную и практическую значимость в распределении ВГРС рек представляет исследование главной фазы водного режима. Для большинства рек в России – это период весеннего половодья, за который формируется основная часть годового стока (до 60-80%). Поэтому в большинстве случаев водность данного периода является показателем водности года в целом.

Первые исследования, посвященные изучению ВГРС, относятся к концу XIX – первой половине XX вв. (Гейнц, 1898; Оппоков, 1911, 1933; Кочерин, 1929; Львович, 1938; Зайков, 1946 и др.).

Вопросу анализа внутригодового распределения стока рек нашей страны посвящено обширное количество исследований (Андреянов, 1960; Девяткова, 1969; Джамалов и др., 2017; Дмитриева, 2011; Евстигнеев и др., 1990; Калинин и др., 2016, 2018, 2019; Комлев, 2002; Кузин, 1960; Кузин, Бабкин, 1979; Лукьянович, 2011; Мордовин, 1996; Никитин, 1952; Сванидзе, 1962; Серпик, 1971; Соколовский, 1946; Шкляев, 1966; Фролова и др., 2010, 2015 и др.).

Существенным вкладом в изучение формирования ВГРС стали работы, посвященные оценке влияния климатических и антропогенных изменений на

речной сток и его внутригодовое распределение (Болгов, 2014, 2022; Гельфан и др. 2021; Георгиади и др., 2013, 2019; Георгиади, Кашутина, 2015; 2016; 2019; Георгиевский, 2005; Долгов, 2018; 2023; Добровольский, 2011, 2015; Калинин и др., 2023; Киреева, Фролова, 2013; Коронкевич и др., 2022, 2023; Лавров, Калюжный, 2016; Лурье, Панов, 1999; Магрицкий, 2015; Магрицкий, Кенжебаева, 2017; Рождественский, 1988; Фомичева, Сикан, 2023; Сивохип, Павлейчик, 2020; Фролова и др., 2013, 2014; Шикломанов, Георгиевский, 2007; Юмина, Терешина, 2017 и др.).

Отдельным направлением изучения ВГРС является анализ главной фазы водного режима, факторов его формирования и прогноз (Апухтин, Кумани, 2015; Борщ и др. 2016, 2017, 2022; Борщ, Христофоров, 2015; Бураков, 1978; Варенцова и др., 2020, 2022; Великанов, 1957; Владимиров, 2009; Гарцман и др., 2019, 2023; Гельфан, 2007, 2014, 2015; Георгиевский, Шаночкин, 2007; Зиновьев, 2014; Лавров, Калюжный; 2016; Миннегалиев, 2018; Морейдо, 2015, 2017; Морейдо, Гарцман, 2023; Симонов и др. 2016; Соколовский, 1968 и др.)

Несмотря на значительное количество исследований в настоящее время отсутствуют подходы в комплексном исследовании ВГРС и его главной фазы водного режима. Оценка стока за период весеннего половодья для водосборов Верхней и Средней Камы выполняется с использованием методов, разработанных еще в середине XX в., которые с тех пор не совершенствовались. Таким образом, актуальность диссертационного исследования определяется необходимостью получения новых знаний о региональных условиях и закономерностях формирования внутригодового распределения стока рек, что будет основой для разработки новых методов и подходов по оценке формирования стока и водности, позволяющей рассматривать проблему комплексно, во взаимосвязи её отдельных частей.

Цель работы: выявление закономерностей внутригодового распределения стока рек водосбора Верхней и Средней Камы в разные по водности годы.

Объект исследования – реки водосбора Верхней и Средней Камы.

Предмет исследования – внутригодовое распределение стока рек в разные по водности годы.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Подготовить информационную базу, включающую сведения о природном и хозяйственном состоянии водосбора Верхней и Средней Камы, гидрологические

и метеорологические данные по этому региону за многоводные, маловодные и средние по водности годы.

2. Выделить типы гидрографов рек в годы разной водности и исследовать закономерности их пространственного распределения по территории.

3. Выполнить районирование территории водосбора Верхней и Средней Камы по условиям формирования внутригодового распределения стока.

4. Изучить влияние естественной зарегулированности стока рек на ВГРС и главную фазу водного режима.

5. Выявить зависимости стока в период главной фазы водного режима в ВГРС от основных факторов в разные по водности годы.

6. Разработать алгоритм заблаговременного расчета главной фазы водного режима и водности года в целом.

Материалами для исследования послужили:

1. Ежедневные, среднемесячные и среднегодовые расходы воды по 49 гидрологическим постам (г/п). Сформированная база данных среднегодовых расходов воды охватывает многолетний период с момента создания гидрологических постов по 2022 г.

2. Данные наблюдений за среднесуточной температурой воздуха и атмосферными осадками на 24-х метеостанциях, расположенных на территории водосбора Верхней и Средней Камы. Величины максимальных снегозапасов использованы как по некоторым гидрологическим постам, где проводятся измерения, так и по метеостанциям.

3. Морфометрические характеристики водосборов рек Верхней и Средней Камы (площади водосбора, средние высоты и средние уклоны водосбора, уклоны главных водотоков) из монографии В.Г. Калинин, С.В. Пьянков (2010).

Для решения поставленных задач в работе применялись следующие **методы**:

- восстановление пропусков в гидрологических рядах и проверка гидрологического районирования были выполнены с применением метода аналогии, реализованного посредством построения уравнений линейной регрессии между исследуемым рядом и реками-аналогами;

- для расчета характеристик стока и факторов его формирования применялись методы статистической обработки;

- для изучения формирования стока рек в тесной связи с физико-

географическими условиями территории и классификации рек на основе анализа формы гидрографов применялись географо-гидрологический и графо-аналитический методы;

- для проведения границ гидрологического районирования, оценки степени залесенности и заболоченности территории, а также создания иллюстраций использованы геоинформационные системы QGIS и ArcGIS;

- для анализа однородности (стационарности) многолетних рядов сезонного стока применялись критерии Смирнова-Граббса и Диксона (для резко отклоняющихся экстремальных значений в эмпирическом распределении), критерий Фишера (для оценки однородности выборочных дисперсий) и критерий Стьюдента (для выборочных средних), согласно СП 529.1325800.2023;

- для оценки качества алгоритма расчета водности года были использованы показатели качества методик прогноза в соответствии с «Наставлением по службе прогнозов» (1962).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Для рек водосбора Верхней и Средней Камы проведена типизация гидрографов по ВГРС и выявлены закономерности их пространственного распределения в годы разной водности.

2. Выполнено уточнение границ гидрологического районирования исследуемой территории на основе выделения районов с однородными условиями формирования внутригодового распределения стока.

3. Проведена оценка многолетнего изменения внутригодового распределения стока рек водосбора Верхней и Средней Камы.

4. Выявлены зависимости доли стока весеннего половодья от его естественной зарегулированности для разных по площади водосборов в многоводные, маловодные и средние по водности годы.

5. Определены основные и косвенные факторы формирования стока весеннего половодья: максимальный запас воды в снеге перед началом снеготаяния; сумма положительных температур воздуха; осадки за период весеннего половодья; величина осеннего увлажнения, и установлены зависимости стока весеннего половодья от этих факторов в годы разной водности.

6. Разработан алгоритм определения водности года на основе комплексного изучения ВГРС и главной фазы водного режима, а также анализа регрессионных моделей за период весеннего половодья.

Положения, выносимые на защиту:

1. Типизация гидрографов и разделение территории по преобладающему типу гидрографа – важное условие объективного выявления закономерностей формирования внутригодового распределения стока и его пространственной неоднородности в разные по водности годы.

2. Критерием районирования территории по внутригодовому распределению речного стока являются одинаковые сроки начала, максимума, окончания весеннего половодья и летне-осенних дождевых паводков, а также значений доли их месячного стока в годовом.

3. Естественная зарегулированность стока – одно из важнейших неклиматических свойств формирования стока весеннего половодья и его доли в годовом стоке.

4. Комплексное исследование ВГРС совместно с главной фазой водного режима и факторов ее формирования в многоводные, средние и маловодные годы является основой для разработки алгоритма расчета водности года.

Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования. Выполнено уточнение и дальнейшее развитие подхода В.Г. Калинина (2014) для изучения особенностей внутригодового распределения стока рек и пространственной неоднородности его формирования на территории водосбора Верхней и Средней Камы. Получили дальнейшее развитие существующие теоретические положения о причинно-следственном характере взаимосвязи физико-географических, метеорологических факторов и параметров ВГРС и его главной фазы водного режима путем изучения региональных особенностей распределения характеристик стока. Полученные выводы демонстрируют важность учета региональных особенностей при оценке водности.

Практическая значимость работы. Результаты комплексного исследования внутригодового распределения стока в разные по водности годы с разработанным алгоритмом расчета стока весеннего половодья и определения водности года могут быть использованы в работе Пермского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Камского бассейнового водного управления, Филиала ПАО «РусГидро» – «Камская ГЭС», научных и проектных организациях. Также результаты работы могут быть применимы для Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий в целях заблаговременной оценки объемов стока в период весеннего половодья.

Своевременная оценка водности способствует предотвращению опасных гидрологических ситуаций и планированию мероприятий по предупреждению затопления территорий, занятых хозяйственной деятельностью.

Кроме того, получен акт б/н от 20 ноября 2025 г. о внедрении результатов диссертационного исследования в работу ООО «Центр водохозяйственных решений».

Степень достоверности результатов исследований. Достоверность полученных результатов обеспечивается верификацией фактических и расчетных значений на независимом материале.

Апробация работы. Основные положения работы обсуждались на заседании кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов Пермского государственного национального исследовательского университета (2023 г., 2025 г., 2026 г.), а также на совместном научном семинаре лабораторий гидрологии и климатологии и отдела гляциологии ИГ РАН с привлечением специалистов из других организаций (2021 г., 2025 г., 2026 г.).

Результаты исследований докладывались и обсуждались на региональных, всероссийских и международных научных конференциях, в числе которых:

1. Международная научная конференция памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии», г. Санкт-Петербург, 2018 г.

2. II Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития», г. Санкт-Петербург, 2018 г.

3. Межрегиональная научно-практическая конференция студентов и аспирантов «Вопросы гидрологии, геоэкологии и охраны водных объектов» г.Пермь, 2019 г.

4. VII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов», г. Пермь, 2019 г.

5. III Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития», г. Санкт-Петербург, 2019 г.

6. Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти чл.-корр. РАН А.Н. Антипова, г. Иркутск, 2019 г.;

7. Международная научная конференция памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению» г. Санкт-Петербург, 2020 г.;

8. XVI Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Географическое изучение территориальных систем», г. Пермь, 2021 г.

9. VIII Всероссийский объединённый метеорологический и гидрологический съезд; г. Санкт-Петербург, 2024 г.

По теме диссертации имеется 20 публикаций, в том числе 4 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, сборе и обработке исходных материалов, выполнении расчетов и анализе их результатов.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. В работе 176 страниц, 27 рисунков и 46 таблиц. Библиографический список насчитывает 282 источника, из которых 47 на иностранном языке.

В первой главе приведен обзор научной литературы по теме исследования, рассмотрены факторы формирования речного стока и его внутригодового распределения.

Вторая глава посвящена физико-географическим особенностям территории водосбора Верхней и Средней Камы и дана характеристика исходных данных и методов исследования. Особое внимание посвящено рассмотрению комплексного подхода к исследованию внутригодового распределения стока в разные по водности годы и главной фазы водного режима рек исследуемой территории с разработкой алгоритма расчета объема стока весеннего половодья и водности года.

В третьей главе представлены результаты выявленных закономерностей формирования ВГРС на реках исследуемой территории в разные по водности годы, предложена типизация гидрографов рек и определены закономерности их пространственного распределения по территории в годы разной водности; выделены районы с однородными условиями формирования ВГРС и уточнено гидрологическое районирование для рек водосбора Верхней и Средней Камы; выполнена оценка многолетних изменений внутригодового распределения стока рек; проведен анализ влияния естественной зарегулированности на ВГРС и главную фазу водного режима (весеннее половодье) с учетом различия площади водосборов рек.

В четвертой главе представлен детальный анализ формирования главной фазы водного режима рек, выявлены характерные даты ее формирования в разные по водности годы, проведено исследование влияния факторов подстилающей поверхности водосбора на продолжительность весеннего половодья; оценено влияния метеорологических факторов на формирование стока весеннего половодья в разные по водности годы; выполнен анализ формирования половодья и зависимостей слоя стока от основных факторов: максимального запаса воды в снеге перед началом снеготаяния, сумм осадков за период весеннего половодья, величины осеннего увлажнения и сумм положительных температур воздуха; определены главные и косвенные факторы формирования главной фазы водного режима; рассмотрена возможность учета влияния всех исследуемых факторов в виде комплексного параметра.

В пятой главе разработан алгоритм определения объема стока за период главной фазы и водности года в целом на основе анализа весеннего половодья и регрессионных моделей. Приведена характеристика среднемесячного и годового притока воды с учетом влияния климатических изменений. Построены и проанализированы зависимости множественной линейной регрессии объема стока воды половодья от основных и косвенных факторов, влияющих на формирование весеннего половодья. Для каждого створа выбрана регрессионная модель с наилучшей теснотой связи и критериями качества. Выполнена оценка качества полученного алгоритма на независимом материале.

В заключении приведены основные результаты исследования.

ГЛАВА 1. ФОРМИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА

1.1. Основные факторы формирования речного стока

Речной сток в широком смысле – это перемещение воды в процессе ее круговорота в природе в форме стекания по речному руслу (Чеботарев, 1978).

Также стоком в гидрологии называют природное явление перемещения свободной воды в пределах суши под воздействием гравитационных сил (Комлев, 2002). Водные потоки, воздействуя на земную поверхность, производят разрушение и смыв слагающих ее горных пород и почв, наблюдается перемещение разрыхленного материала вниз по течению и, наконец, отложение (или многократное переотложение) последнего на относительно низких уровнях либо там, где поток прекращает свое существование (Макаревич, Яротов, 2019).

Внутригодовое распределение стока – это распределение величины стока по календарным периодам или сезонам года (Чеботарев, 1978).

Формирование стока и его внутригодового распределения складывается из большого числа частных процессов, локализованных в границах речных бассейнов. Однако эти процессы имеют различную значимость и характер взаимодействия в определенные отрезки времени. Важно подчеркнуть общую особенность речного стока: его ход во времени зависит от выпадения осадков и хода метеорологических элементов, формирующих состояние поверхности и почвогрунтов бассейна при относительно неизменных условиях, выражающих физико-географический характер водосбора (Виноградов, 1988). На рисунке 1.1 представлена схема процессов формирования стока в природе по Ю.Б. Виноградову.

Главная роль в определении величины стока, а также его изменчивости принадлежит атмосферным факторам. В то же время режим стока реки, а нередко и ее водность, во многом определяются природными особенностями водосборного бассейна, в пределах которого проявляется влияние факторов литосферы, гидросферы и биосферы.

В настоящее время существует большое количество классификаций факторов формирования стока. С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем (1934) предложено разделение всех факторов на две генетически взаимосвязанные группы – климат и ландшафт. В работе Б.В. Полякова (1946) также выделено две группы: основные факторы стока (атмосферные осадки и испарение) и

дополнительные (все остальные факторы). А.В. Огиевский (1951), предложив сложную классификацию, выделил две основные группы - климатические факторы (факторы суммарного стока) и факторы процессов стока.



Рис. 1.1. Система процессов формирования стока (по Ю.Б. Виноградову, 1988)

Д.Л. Соколовским (1968) также выделено две группы климатических факторов и местные, или факторы подстилающей поверхности, включающие все факторы, кроме климата. Рассматривая режим речного стока, А.И. Чеботарев (1975) разделил все физико-географические факторы на метеорологические, определяющие «режим вод суши», и факторы подстилающей поверхности, определяющие «процессы взаимодействия поверхностных и подземных вод». Детальная классификация факторов предложена А.М. Владимировым (1990). Он выделил стокообразующие факторы (осадки, подземные воды), косвенные (испарение, дефицит влажности, температуры воздуха и почвы, озера, болота, ледники, наледи, лес, рельеф, геолого-почвенные условия) и условные (площадь водосбора, глубина эрозионного вреза, уклоны, средняя высота водосбора).

Пермский ученый А.М. Комлев (2002) выделял три группы факторов, влияющих на формирование речного стока:

Климатические факторы: средние многолетние величины атмосферных осадков, испарения, температуры воздуха. Определяют норму различных характеристик стока и тип водного режима реки.

Метеорологические факторы: осадки, испарение и температура воздуха за конкретные годы и более конкретные интервалы времени. Определяют многолетнюю изменчивость характеристик стока водного режима рек.

Факторы речного бассейна: это размер и форма бассейна, рельеф, растительность, водные бассейны, почвогрунты. Осуществляют естественное регулирование стока, могут обуславливать отклонения характеристик стока, а также его режима, от зональных значений.

Таким образом, речной сток относится к многофакторным природным процессам.

1.1.1 Факторы атмосферы

Главной в формировании речного стока является группа климатических факторов (рис. 1.2). В данной группе на первом месте находятся осадки. Они могут быть твердыми и жидкими. К твердым относятся снеготопивы, определяемые на водосборе к началу половодья, а также выпадающие в период половодья снег, снежная или ледяная крупа. Последние не имеют существенного значения и могут не учитываться, в то время как выпадающие в период половодья жидкие осадки (дождь, морось) могут формировать дополнительные пики на подъеме и на спаде половодья (Владимиров, 2009).

Атмосферные осадки. Атмосферные осадки являются основным из главных климатических факторов, оказывающих большое влияние на формирования речного стока бассейна реки, и являются одним из основных слагаемых уравнения водного баланса. Чем больше осадков выпадает в бассейне, тем при прочих равных условиях больше воды стекает в реки (Виноградов, 1988).

В тёплый период года осадки образуют сток непосредственно после выпадения и, частично, за счёт образования подземных вод, которые могут попадать в речную сеть значительно позже и на удалении от территории выпадения осадков.

В холодный период осадки накапливаются в виде снега, таяние которого весной вызывает половодье. Главными в формировании речного стока являются твердые осадки, а именно снеготопив, определяемый на водосборе к началу

половодья. Снеготаяние существенно предопределяет ход остальных процессов. Таяние снежного покрова начинается при положительном тепловом балансе его поверхности, интенсивность и продолжительность снеготаяния зависят от суммарного притока тепла к снежному покрову (Евстигнеев, 1990).

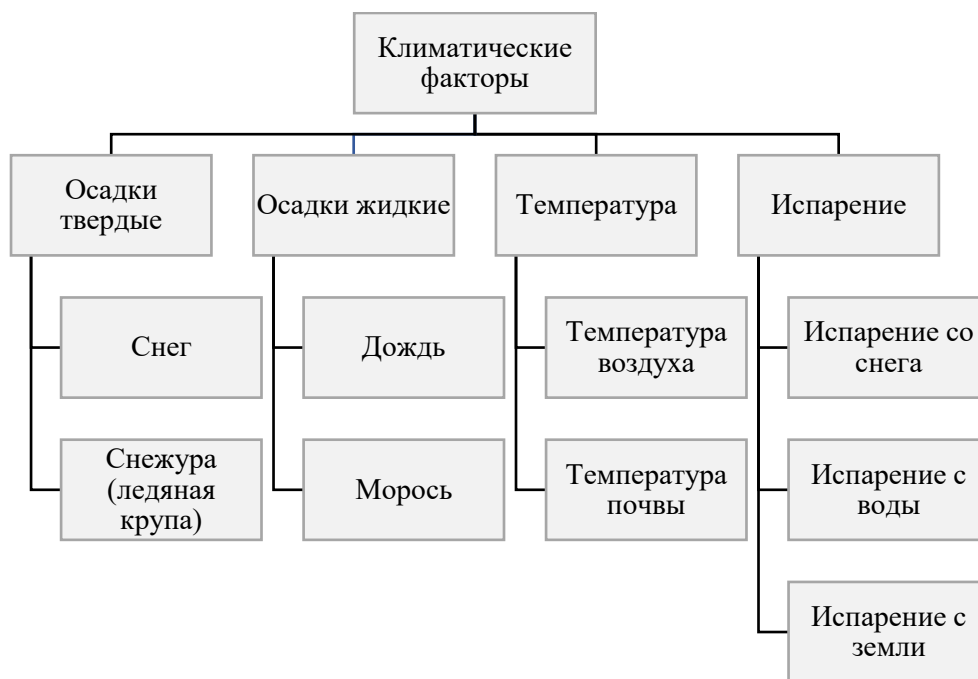


Рис. 1.2. Составляющие климатических факторов, участвующие в формировании речного стока (Владимиров, 1990)

С.А. Лавров и И.Л. Калюжный (2016) установили, что вклад оттепелей в формирование зимнего стока в январе и феврале составляет 38% общего увеличения зимнего стока за последние десятилетия.

Осадки за период весеннего половодья, являясь дополнительным источником питания рек, также играют весьма важную роль в формировании весеннего половодья. Можно выделить осадки периода снеготаяния и осадки последующего весеннего периода до конца половодья. Первые обращаются в сток с теми же потерями, что и снегозапасы, вторые – с несколько большими потерями. Момент оттаивания почвы примерно совпадает с окончанием снеготаяния в лесу, а в безлесных районах оттаивание почвы начинается спустя 5-8 дней после схода снега.

Однако подготовка водосбора к формированию стока и главной фазы водного режима (половодья) происходит еще с осени, когда наблюдается осеннее увлажнение бассейна реки. В этом случае учитывается средняя по бассейну реки влажность почвогрунтов перед началом зимнего сезона. Чем меньше их

влажность (сухая осень), тем больше вероятность увеличения потерь воды при снеготаянии весной, т.е. тем меньше коэффициент стока. При большой влажности почвогрунтов (мокрая осень) потери поверхностного стока в результате инфильтрации будут значительно меньше, чем при сухой осени, т.е. коэффициент поверхностного стока в результате инфильтрации будет большим, что способствует формированию высокого половодья. В районах с оттепелями, происходящими в зимний сезон, средняя по бассейну влажность, зафиксированная в осенний сезон, может значительно изменяться зимой в сторону увеличения, особенно на малых реках (Андреянов, 1960).

Испарение. Вторым важным фактором является испарение с поверхности речного бассейна, определяющее величину годового стока реки, которое в свою очередь складывается из испарения с почвы, включая транспирацию растений, с поверхности водоемов, находящихся на его территории, и с поверхности снежного покрова. Если испарение с водной поверхности и с поверхности снега определяется метеорологическими факторами, то суммарное испарение с поверхности суши, помимо метеорологических факторов, зависит от содержания воды в почве, их водно-физических свойств и характера растительного покрова (Давыдов и др., 1973).

Главным образом испарение зависит от увлажнения территории, и в меньшей степени оказывает влияние на сток в областях избыточного увлажнения с высоким коэффициентом стока, и, наоборот, становится определяющим в зоне недостаточного увлажнения, где на испарение расходуется большая часть атмосферных осадков.

Впервые в 1911 г. Э.М. Ольдекоп установил значимость отдельных факторов в процессе испарения с поверхности речных бассейнов, исходя из следующих положений: 1) при малых количествах осадков они полностью испаряются; 2) по мере увеличения количества осадков величина испарения возрастает, но это увеличение испарения продолжается до некоторого предела, соответствующего определенному количеству осадков; 3) при дальнейшем увеличении их добавочные порции осадков уже не вызывают увеличения испарения, а затрачиваются на сток, и величина испарения становится почти постоянной (Ольдекоп, 1911). Эту предельную величину испарения ученый назвал максимально возможным испарением и определил два типа речных бассейнов. В бассейнах первого типа, расположенных в зонах недостаточного увлажнения, сток слабо зависит от осадков, потому что при высоком дефиците влажности расходуются на испарение. Таким

образом, величина коэффициента испарения высока, а коэффициента стока – небольшая. В бассейнах второго типа, относящихся к областям достаточного и избыточного увлажнения, испарение слабо зависит от осадков, так как оно близко к максимально возможному. Поэтому тут хорошо выражена связь стока с осадками (Комлев, 2002).

Таким образом, суммарные потери осадков на испарение будут больше в тех районах, где в теплый период выпадает их большая часть, потому что наибольшая величина испарения приходится на теплую часть года. В зимний сезон испарение с поверхности водосбора является наименьшим в году. Однако с началом весны испарение быстро возрастает, а в последней стадии снеготаяния, когда обнажается большая часть поверхности водосбора и появляется открытая вода, потери на испарение становятся наибольшими. Но с образующимся количеством воды на водосборе они не сопоставимы (Соколовский, 1968).

Температура воздуха. Температура воздуха влияет на речной сток через различные процессы, которые определяют гидрологический режим рек. Это влияние опосредовано и проявляется через другие природные факторы, такие как количество выпавших атмосферных осадков, испарение, интенсивность снеготаяния и другие (Комлев, 2002).

Для температуры воздуха характерна закономерность территориального распределения по широте и высоте местности. Внутригодовой ход температуры воздуха определяет сроки наступления и окончания, а также продолжительность холодного и теплого периодов, следовательно, и сроки наступления фаз водного режима. Именно, в связи с этим и выделяются подтипы рек с весенним, весенне-летним и летним половодьем. Температурный режим в период таяния снегов и ледников во многом определяет его интенсивность, оказывая влияние на форму гидрографа половодья и величину максимального стока (Андреянов, 1960).

В течение теплого периода осадки выпадают в жидком виде и сразу же участвуют в формировании стока. В этот же период происходит пополнение запасов подземных вод. В холодный период, особенно с устойчивыми отрицательными температурами, без существенных оттепелей, выпадающие в твердом виде осадки накапливаются до наступления теплого периода. Реки в этот период практически полностью питаются за счет подземных вод. В зимний сезон от нее зависит глубина промерзания почвы, а также глубина и характер многолетней мерзлоты. Сезонное и многолетнее промерзание грунтов существенно сказывается на их фильтрационных способностях и, следовательно, на условиях пополнения запасов подземных вод в

теплый период года, на условиях дренирования этих вод и формировании зимнего стока рек (Комлев, 2002).

Таким образом, температура воздуха оказывает весьма существенное влияние как на соотношение различных источников питания, участвующих в формировании речного стока, так и на режим этого стока. Тип водного режима той или иной реки формируется под совместным воздействием всего комплекса климатических факторов, свойственных той или иной климатической зоне. Поэтому, зная конкретные климатические условия исследуемой территории, можно составить предварительное суждение как о норме годового стока, так и об основных особенностях его распределения в году (Владимиров, 1990).

1.1.2 Факторы речного бассейна

Речной сток формируется под воздействием уникального сочетания физико-географических особенностей водосборного бассейна реки. Многие особенности речного бассейна могут влиять на отклонение количественных характеристик стока от их зональных значений, определяемых климатом. Речной бассейн характеризуется определенным географическим положением, размерами и формой, геологическим строением, рельефом и почвенным покровом, которые оказывают влияние на формирование стока. Также на речной сток влияют расположенные на нем элементы биосферы (виды флоры и фауны) и гидросферы (озера, болота, горные ледники и т.д.). Большая часть вышеперечисленных факторов отражает климатические особенности территории, в то время как другие носят азональный характер. В совокупности они оказывают воздействие на величину речного стока и его внутригодовое распределение.

Если климатические факторы определяют количество воды, образующейся в результате снеготаяния и выпадения дождей, то геоморфологические факторы в основном трансформируют ее запасы во времени и по территории бассейна реки, определяя потери воды на водосборе и время ее добегания до расчетного створа. Их количество весьма велико и разнообразно (Владимиров, 1990).

Географическое положение. Представление о любом речном бассейне начинается с анализа его географического положения, от которого зависит климат, а, следовательно, и водоносность реки, режим ее стока. Основные зональные характеристики стока обуславливаются в пределах равнины широтной зональностью, а на возвышенностях и в горах – сочетание этой зональности с

высотной поясностью. Однако роль этих главных факторов часто затушевывается влиянием других азональных факторов климата, зависящих от расположения бассейна, от преобладающего направления движения воздушных масс, расположения бассейна и его отдельных частей по отношению к характеру рельефа прилегающей территории, особенно к крупным горным системам или отдельным хребтам. Все эти особенности положения речного бассейна определяют степень и режим его увлажнения и многие черты водного режима рек (Комлев, 2002).

При прочих равных условиях большое влияние на условия формирования стока реки оказывает общая экспозиция ее бассейна, а также отдельных его частей по отношению к странам света, которые часто определяют главное направление течения реки. В разно ориентированных по отношению к странам света бассейнах по-разному протекают процессы весеннего снеготаяния и формирования волны весеннего половодья.

Размер и форма бассейна. Размеры водосборного бассейна определяют и размер реки, ее водоносность. Чем больше площадь бассейна, тем больше при прочих равных условиях расход воды в реке. Весьма большое влияние размер речного бассейна оказывает на процессы формирования стока. Чем больше бассейн, тем больше проявляется его роль как регулятора стока. В пределах большого бассейна разнообразнее количество и режим поступления на его поверхность талых и дождевых вод. С увеличением размеров бассейна возрастает длина путей движения воды по русловой сети, увеличивается разнообразие скоростей движения и времени добегания воды через толщу почв и горных пород, возрастают глубина вреза речного русла и относительный объем подземного стока в общей его величине (Давыдов и др., 1973).

Помимо размеров речного бассейна, существенное влияние на процессы стока оказывает и его форма (длина бассейна, его средняя и наибольшая ширина, коэффициент асимметрии и т.д.). В формировании стока важное значение имеют время добегания воды с разных участков бассейна по склонам до гидрографической сети, а по ней до расчетного створа. Это время зависит от формы бассейна. Если бассейн реки сильно вытянут в длину, волны половодий и паводков, двигаясь вниз по реке, сильнее распластываются, так как боковая приточность невелика. При большем времени добегания воды по склонам – больше потери ее на инфильтрацию и испарение (Комлев, 2002).

Рельеф подразделяется на макро-, мезо- и микроформаты, и размер этих

образований оказывает различное влияние на формирование речного стока. При анализе макрорельефа ключевую роль играет положение водосборного бассейна относительно этих крупных форм и определяет границы водоразделов, размеры и форму речного бассейна, его экспозицию и средний уклон. Со степенью расчлененности рельефа связана крутизна склонов речного бассейна (уклон) длина путей склонового стока. Прежде всего, с уклоном непосредственно связаны скорости движения воды. При высоких скоростях поверхностного стока уменьшаются его потери на инфильтрацию и испарение. М.И. Львовичем (1963) отмечено, чем больше уклоны склонов бассейна, тем меньше на них замкнутых микропонижений, в которых аккумулируется, а затем и расходуется на инфильтрацию и испарение часть поступившей на поверхность бассейна воды. Расчлененность рельефа во многом определяет глубину залегания и динамику подземных вод, что сказывается на характере естественной зарегулированности стока, величине и режиме его в период межени. В условиях равнины, особенно на безлесных пространствах, расчлененность рельефа также как и в горах влияет на ветровое перераспределение снега. Снег, сдуваемый с полей, скапливается в оврагах и долинах рек, где снеготопасы к концу зимы превышают средние по бассейну в несколько раз. В весенний период это отражается на процессе снеготаяния, увеличивая его длительность.

Почвы и горные породы. Существует большое количество различных типов почв, также, как и горных пород. Важнейшим свойством почвогрунтов является их водопроницаемость (водопроницающая способность). При слабой водопроницаемости почв и грунтов увеличивается поверхностный сток, и ухудшаются условия пополнения запасов грунтовых вод (Марчик, Ефремов, 2006). Сток рек в этих условиях менее зарегулирован. Условия дренирования грунтовых вод речной сетью, интенсивность истощения их запасов также зависят от водопроницающей способности грунтов. Другим важным свойством почвогрунтов является их водоудерживающая способность. При высокой водоудерживающей способности почвогрунтов большая часть проникшей в них влаги может расходоваться на испарение. Таким образом, водно-физические свойства почв во многом определяют характер и интенсивность процессов стока, распределение его на поверхностный, почвенный и грунтовый слой, его естественную зарегулированность. Важное значение имеет и чередование слоев горных пород. Характеризующиеся различной водопроницаемостью, и их наклон, определяют число и характер водоносных горизонтов, динамику подземных вод, а также характер их связи с поверхностными водами. Наряду с климатом и

рельефом геологическое строение подземного водосбора определяет также глубину залегания подземных вод. От минералогического состава горных пород зависит их важное свойство – растворимость. Именно с хорошо растворимыми в воде горными породами связано наличие такого важного фактора речного стока, как карст. Для закарстованных районов характерно поглощение поверхностного стока понорами и карстовыми воронками, наличие в период межени сухих участков русел малых рек и общей разреженности гидрографической сети, а также высокий подземный сток более крупных рек, дренирующих закарстованные толщи (Комлев, 2002).

Растительность. Особую роль в формировании речного стока играет растительность, поскольку она влияет как на накопление осадков, на их расходование, а также на увеличение шероховатости земной поверхности, вследствие чего замедляется стекание воды по поверхности земли и увеличивается возможность инфильтрации влаги в почву (Давыдов и др., 1973).

Лес оказывает в большинстве случаев положительное влияние на речной сток; увеличивается количество осадков, уменьшается испарение с почвы, более медленно тают снега и др. Отрицательное влияние леса на сток сказывается в увеличении потерь влаги на транспирацию и испарение с крон деревьев.

Травяная растительность уменьшает поверхностный сток за счет большей фильтрации воды в грунт и увеличения потерь воды на испарение и транспирацию. Если расходование влаги на транспирацию растениями превышает поступление воды в грунт за счет большей фильтрации растительных почв, наличие растительности уменьшает не только поверхностный сток, но и подземный (Марчик, Ефремов, 2006).

Антропогенные факторы. Основные составляющие антропогенных факторов, способных в той или иной мере повлиять на величину стока включают: водохранилища (пруды), урбанизация, осушение земель, агротехнические мероприятия (Фролова, 2020).

Наличие в русле реки или на ее водосборе водохранилища или пруда существенно искажает характер речного стока, уменьшая максимальные расходы воды в весеннее половодье и его продолжительность ниже плотины. Это влияние будет особенно большим при наличии каскада прудов или водохранилищ, что нередко существует в степных районах. Однако в случае прорыва хотя бы одной из плотин может произойти наводнение вплоть до катастрофического (Владимиров, 2009).

При осушении заболоченных земель образуется сеть дренажных канав и

каналов, которые позволяют увеличить сброс поверхностной воды, образующейся при снеготаянии и не попавшей в подземные воды. Поэтому гидрограф имеет более резкий вид – быстрый подъем и быстрый спад расходов воды по сравнению со стоком с естественных водосборов.

При осуществлении агротехнических мероприятий на водосборе реки (снегозадержание, глубокая осенняя (зяблевая) пахота) увеличиваются потери поверхностных вод в весенний период в результате потерь на инфильтрацию. Однако при нарушении правил пахоты на склонах водосбора поверхностный сток может резко увеличиться, что ведет к увеличению стока наносов, заилению русла и повышению уровня воды (Красов, Лысачев, 2009).

При наличии обширных застроенных территорий (урбанизированные территории) возможно уменьшение максимальных расходов воды на малых реках ниже города (поселка) вследствие вывоза снега с застроенных территорий, а также ускоренного таяния снега на территории городов.

Таким образом, формирование стока на реках возникает в результате существующих до его формирования и в процессе его образования большого числа физико-географических и антропогенных факторов. Они могут воздействовать последовательно или одновременно в различном сочетании. Каждый из них в разные годы имеет различный вклад (весовой индекс) в его формирование. Более того, в отдельные годы не все факторы участвуют в образовании стока. Поэтому перестановка факторов по их вкладу, как и их сочетание, меняется по годам. Исключение составляют лишь снегозапасы, ежегодно образующие половодье (Владимиров, 2009).

1.2 Изученность речного стока и его внутригодового распределения

Аналізу закономерностей формирования речного стока посвящено большое количество работ. С начала XIX в. можно выделить основные (общегосударственные) запросы практики, предопределившие развитие инженерно-гидрологической мысли и формирования исследований в области речного стока и его внутригодового распределения:

- **1837-1920 гг.** – развитие водного транспорта, железных дорог и мостостроение;
- **1920-1960 гг.** – разработка и реализация плана ГОЭЛРО, крупное гидроэнергетическое строительство, индустриализация и освоение восточных районов страны;

- **1960-1980 гг.** – гидромелиоративное строительство, развитие трубопроводного транспорта, освоение месторождений нефти и газа;
- **1980-1990 гг.** – реконструкция существующих транспортных и энергетических систем, наращивание их мощностей (Соколовский, 1946);
- **1991-2025 гг.** – адаптация инженерно-гидрометеорологических изысканий к климатическим изменениям стока.

Зарождение основного этапа исследований по расчетам речного стока приходится на 20–30-е годы XX века: в тот период работы велись преимущественно для создания методик определения нормы стока, его многолетней изменчивости и внутригодового распределения (Кочерин, 1929; Зайков, 1946; Огиевский, 1936, 1952; и др.), расчетов максимального стока (Великанов, 1964; Дубелир и др., 1938; Протодьяконов, 1960; Срибный, 1940; Соколовский, 1943 и др.) и минимальных расходов воды (Антонов, 1941; Урываев, 1941; Шевелев, 1937 и др.) при наличии и отсутствии данных гидрологических наблюдений.

Исследования внутригодового распределения стока. Начало изучения внутригодового распределения речного стока (ВГРС) было положено еще в дореволюционный период. В 1884 г. А.И. Воейков предложил первое районирование рек по водному режиму, разделяя реки земного шара на семь групп в зависимости от генезиса питающих их вод. В этот же период проводились первые исследования, посвященные изучению многолетних изменений ВГРС в Европейской России, в начале XX века Е.В. Оппоков на основе работ Е.А. Гейнца, пришел к выявлению взаимосвязи колебаний речного стока и ВГРС с климатическими особенностями и их циклическом характере (Оппоков, 1911, 1933).

Первые исследования, посвященные созданию классификаций рек страны по ВГРС, которые отражали влияние главным образом климатических особенностей отдельных районов страны, принадлежат М.И. Львовичу (1938, 1963) и Б.Д. Зайкову (1946). Работа М. И. Львовича содержит общие сведения об основных источниках питания, формирующих речной сток в различных физико-географических условиях, и непосредственных расчетных рекомендаций не дает. В ней впервые использованы количественные соотношения для описания особенностей внутригодового распределения стока в зависимости от источников питания. Кроме того, в классификационной схеме реки разделены не только по типам питания, но и по ряду других важных признаков. Большую значимость в исследовании ВГРС рек имеют работы Б.Д. Зайкова (1946), базирующиеся на

изучении гидрографов речного стока и разделение рек на группы в зависимости от характера прохождения различных фаз водного режима. Несмотря на это, представленные им модели отображают только общие, зональные характеристики ВГРС, которые требовали детализации и адаптации с учетом локальных условий в различных физико-географических областях страны. Кроме того, в 1944 г. ученый разработал карты, демонстрирующие сезонное распределение стока (в % от соотношении от годового). Эти карты стали основой для общего понимания распределения годового стока по сезонам. В 1960 г. В.Г. Андреев уточнил карты распределения слоя стока за летне-осенний и зимний периоды, основанные на рекомендациях Д.Л. Соколовского.

До этого, в 1943 году, Д.Л. Соколовский создал картографические материалы, отражающие распределение средних значений модулей стока для летнего (июль-сентябрь), осеннего (октябрь-ноябрь) и зимнего (декабрь-февраль или декабрь-март) сезонов. Д.Л. Соколовским составлены схемы среднего распределения стока внутри года для ряда крупных районов Европейской территории СССР. Для условий северо-западной озерной области они учитывают влияние степени озерности водосбора.

Также детальные схемы, составленные с учетом влияния на ВГРС различных физико-географических особенностей территорий (озерности, площади водосборов и их высотного положения, лесистости, заболоченности, закарстованности территорий и прочих факторов), были предложены К.П. Воскресенским (1951), С.Н. Никитиным (1952), В.Л. Шульцем (1949) и многими другими исследователями для различных районов страны.

В 1948 г. В.А. Троицким впервые выполнено районирование территории СССР по соотношению элементов водного баланса. В направлении с севера на юг ученым выделены гидрологические зоны, каждой из этих зон соответствует характерное соотношение элементов водного и теплового балансов. С изменением этого соотношения от зоны к зоне меняются густота речной сети, степень озерности и заболоченности, глубина залегания грунтовых вод. В дальнейшем эта схема была использована в ряде типизаций более малых территорий и водосборов рек по гидрологическим особенностям.

В 1952 г. С.Н. Никитин установил типовое внутригодовое распределение стока малых рек по 31 району Европейской и 11 районам Азиатской территории СССР. Эти типовые схемы составлены путем отбора в пределах выделенных районов наиболее типичных, по мнению автора, гидрографов за реальные годы в

период, освещенный гидрометрическими наблюдениями. При этом не учитывалось различие внутригодового распределения стока в годы разной водности и для рек с различной площадью водосбора и степенью озерности (Чеботарев, 1975).

Более детальные схемы внутригодового распределения стока для условий рек степной и лесостепной зон Европейской территории СССР разработаны К.П. Воскресенским (1951). Эти схемы дифференцированы в зависимости от площади водосбора применительно к годам различной водности: среднего, обеспеченного на 50%, среднего маловодного, обеспеченного на 80%, маловодного с наиболее низкой меженью, обеспеченного на 97%.

Для горных областей схемы внутригодового распределения стока обычно не только районируются по территории, но и детализируются по высотным зонам (Шульц, 1949; Валесян, 1955; Важнов, 1956 и др.).

В 1960 г. П.С. Кузин объединил ключевые элементы, влияющие на формирование ВГРС, и предложил новую классификацию. Он объединил реки по размеру (большие, средние и малые), учел физико-географические особенности, источники питания рек, типы питания рек, основные гидрологические сезоны и фазы водного режима. Итогом работы стало выделение 3 типов и 14 подтипов водного режима рек как для равнинных, так и для горных областей в разных климатических зонах.

В 2011 г. классификация М.И. Львовича была дополнена 20 новыми типами водного режима рек мира для регионов, по которым у него не имелось фактических данных (Лукьянович, 2011). Кроме того, автором проведена оценка устойчивости типизации сезонной структуры стока рек в разных природных условиях. В Национальном Атласе России (2004) представлены карты типов водных режимов, годового стока и стока рек по типам питания, совместный анализ которых позволяет дать достаточно полную характеристику водного режима рек России, основанную на предшествующих исследованиях в этой области (Фролова и др., 2021).

Наряду с изучением особенностей ВГРС велись работы по разработке расчетных методик. В 50-х годах XX в. разрабатывался расчетный прием внутригодового распределения стока, основанный на компоновке водности отдельных сезонов, исходя из наблюдающихся соотношений между величинами стока за отдельные части года. Это направление развито в работах Г.И. Швеца, И.М. Лившица (1955) и наиболее полно в работе В.Г. Андреенова (1960).

Б.И. Серпик в 1952 г. было предложено при расчете внутригодового распределения стока принимать несколько сочетаний годового стока заданной обеспеченности с весенним стоком различной условной обеспеченности. Сток зимнего сезона принимался ею по среднему соотношению с годовой величиной стока, а летний сток по разности годового суммы весеннего и зимнего стока.

В 1953 г. И.М. Лившиц при компоновке внутригодового распределения стока рекомендовал принимать за основу или водность (обеспеченность) года, или водность лимитирующего сезона. Исходя из указанного принципа, И.М. Лившиц выделил семь типов внутригодового распределения стока: среднее распределение, распределение многоводного года, маловодного года, года с соответственно: а) многоводной весной, б) маловодной весной, в) многоводным летне-осенним сезоном, г) маловодным летне-осенним сезоном.

В.Г. Андреев (1960), обобщив предложения Г.И. Швеца (1946) и И.М. Лившица (1953), устранил недостатки, свойственные этим методам. При становлении схемы внутригодового распределения стока по В.Г. Андрееву (1960) год делится на два периода: весну и межень; межень в свою очередь расчленяется на два сезона: лето-осень и зиму. При этом рассматриваются не календарные, а так называемые водохозяйственные годы – от начала весны до конца зимы.

По этому методу сток за год, лимитирующий период и внутри него за лимитирующий сезон (а не только за год и лимитирующий период, как у Г.И. Швеца, принимается одинаковой обеспеченности (а не различной, как у И.М. Лившица), задаваемой, исходя из задач водохозяйственного проектирования. При этом сток за нелимитирующий период года определяется по разности величин стока за год и лимитирующий период, а сток нелимитирующего сезона – по разности величин стока за лимитирующий период и лимитирующий сезон. Сроки сезонов назначаются едиными для всех лет ряда с округлением их до целого месяца.

В 1962 г. Г.Г. Сванидзе разработал метод фрагментов, предназначенный для моделирования гидрологических рядов с сохранением внутригодовой структуры стока. Суть метода заключается в разделении исходного нестационарного процесса на две компоненты: последовательность годовых (или сезонных) величин стока и последовательность нормированных «фрагментов», описывающих типовую форму гидрографа. Моделирование выполняется в два этапа: сначала генерируются годовые объемы стока (например, с использованием

авторегрессионных моделей), затем каждый годовой объем «разлагается» на внутригодовые интервалы (месяцы, декады) путем умножения на фрагменты — средние многолетние доли месяца в годовом стоке. Ключевое достоинство метода — точное воспроизведение как многолетней изменчивости (автокорреляции), так и характерного сезонного хода стока, включая фазы половодья и межени (Сванидзе, 1962).

Методы расчета ВГРС совершенствуются и по настоящее время (Раткович, Болгов, 1996; Гриневич и др., 1998; Исмаилова и др, 2007; Гареева, 2017, 2018; Сенчуков и др, 2018; Болгов, Филиппова 2022; Овсянникова, Сикан, 2023).

В настоящее время выполнено очень большое количество работ по исследованию ВГРС рек Российской Федерации, таких как Ока, Обь, Волга, Тобол, Вилюй, Амур, Белая, Северная Двина, Инстроч, Урал, Томь, Васюган, Печора, Зилаир, Кизил, Мокша, Ай, Лена, Алей, Абакан, Алей, Яна (Алиева, 2016; Бабкина, 2006; Баринов, 2019; Барышев, 2016, 2017; Винокуров, 2016; Гареева, Фатхутдинова 2018; Герасимова, Нелюбина, 2019; Дмитриева, 2011; Загитова, 2004, 2014; Куприянов, 2013; Кустов, Комусова, 2016; Лешан, Силантьев, 2018; Макарычев и др, 2013; Мордовин, 1996; Нарожный и др., 1998; Наумов, 2022; Ноговицин, 1974; Перминов, Смирнова, 2014; Спирин, 2020; Петров и др, 2015; Решетникова и др., 2010; Сивохиц, Павлейчик, 2020; Фролова Н.Л. и др., 2010, 2015 и др.).

Существенный вклад в развитие теоретических основ и методов анализа внутригодового распределения речного стока (ВГРС) внесли исследования, выполненные в Институте водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН) и Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова (МГУ).

Например, в своих работах М.В. Болгов (1996) заложил основы моделирования внутригодовых колебаний стока с учетом периодической корреляции, что позволяет воспроизводить естественную изменчивость речного режима. Позже ученым предложен подход к расчету внутригодового распределения стока в нестационарных условиях, обобщил метод компоновки сезонов для нестационарных случаев и внедрил байесовские алгоритмы (1996, 2022).

Работы Н.Л. Фроловой и др. посвящены анализу зависимостей характеристик внутригодовой неравномерности стока (коэффициент естественной зарегулированности стока, доля объёма весеннего половодья в

годовом стоке) от гидрографических, морфометрических, климатических и ландшафтных факторов (Фролова и др., 2010). Другая работа рассматривает современные особенности внутригодового распределения стока равнинных рек Европейской территории России, где выявлены значительные переформирования в бассейнах Волги и, главным образом, Дона (Фролова и др., 2015).

За последние несколько десятилетий особое внимание уделяется анализу многолетнего изменения ВГРС на крупных реках России, таких как рр. Лена, Волга, Ока, Урал, Вилной, Дон, Северная Двина, Верхняя Колыма, Печора, Тобол, Кама и др., а также оценке климатических и антропогенных факторов, оказывающих различное влияние на колебания стока (Болгов, 2018; Винокуров, Коротыгина, 2017; Георгиади и др., 2013, 2019; Георгиади, Кашутина, 2015; 2016; 2019; Георгиади, Милюкова, 2023; Джамалов и др., 2017; Дмитриева, 2011; Добровольский, 2011; Долгов, 2018, 2023; Домнин, 2018; Жуков, Айбулатов, 2024; Зайцева, 1990, 1996, 2003; Исмайылов, Мурашенкова, 2019; Калинин и др., 2020, 2023; Коронкевич и др. 2022, 2023; Коронкевич, 1990; Лебедева, 2022; Лурье, Панов, 1999; Магрицкий, Кенжебаева, 2017; Назаренко, 2020; Ортбаева, 2005; Пряхина и др., 2023; Полонский, Остроумова, 2010; Самойлова и др., 2024; Сивохиц, Павлейчик, 2020; Сумачев и др., 2024; Ушаков, 2021; Фомичева, Сикан, 2023; Фролова и др., 2014, 2018, 2020; Юмина, Магрицкий, 2024; Юмина, Терешина, 2017 и др.).

Большой вклад в исследование ВГРС внесли ученые Института географии РАН, ими было выявлено также, что внутригодовое распределение речного стока определяется совокупным влиянием климатических факторов (режим осадков, температура) и физико-географических характеристик водосборов, предопределяющих сезонную неравномерность стока. Рассмотрены антропогенные и климатические изменения водных ресурсов рек России. В условиях современных климатических трансформаций выявлены направленные изменения: смещение сроков половодья, увеличение доли стока в холодный период и рост вклада дождевого питания, приводящие к снижению контрастности сезонной структуры. Антропогенное воздействие существенно трансформирует внутригодовое распределение, снижая амплитуду сезонных колебаний и изменяя естественное соотношение фаз водного режима (Коронкевич, 1990; Коронкевич и др. 2022, 2023; Зайцева, 1990, 1996, 2003; Георгиади и др., 2013; Георгиади, Милюкова, 2023; Георгиади, Кашутина, 2015; 2016; 2019; Долгов, 2018, 2023).

Для водосбора Верхней и Средней Камы выполнено не много исследований

по анализу ВГРС, при этом основоположником в этой области можно считать А.С. Шкляева (Краткий справочник..., 1966). В его работах ВГРС рассматривается как интегральная характеристика водного режима, формируемая под влиянием климатических факторов и атмосферной циркуляции. Показано, что сезонные колебания стока на Урале определяются распределением осадков и термического режима, которые, в свою очередь, связаны с особенностями циркуляционных процессов. Результаты анализа распределения стока использованы при гидрологическом районировании водосборов на основе элементов водного баланса.

В кандидатской диссертации Т.П. Девятковой (1969) выявлено, что ВГРС существенно зависит от особенностей атмосферной циркуляции, определяющей режим осадков и водного питания рек. Установлено, что изменения циркуляционных процессов приводят к перераспределению стока по сезонам, смещению сроков половодья и изменению степени сезонной неравномерности.

В монографии А. М. Комлева (2002) показано, что внутригодичное распределение стока представляет собой результат мультифакторного воздействия климатических и местных физико-географических факторов. Предложена дифференциация влияния факторов по гидрологическим фазам, а также разделение климатических и метеорологических факторов, определяющих многолетние закономерности и межгодовую вариабельность соответственно. Внутригодичное распределение стока рассматривается как один из ключевых критериев гидрологического районирования, отражающий природно-ландшафтные особенности водосборов и обеспечивающий комплексную характеристику сезонной структуры водного режима.

В исследовании А.П. Лепихина (2005) установлено, что сезонное распределение стока рек Камского бассейна характеризуется доминированием весеннего половодья и высокой внутригодичной неравномерностью. Антропогенное регулирование стока приводит к сглаживанию сезонных колебаний, снижению пиков половодья и увеличению доли стока в меженные периоды, что обуславливает трансформацию естественной структуры годового гидрографа.

В работе Д.Е. Клименко и Е. П. Корепанова (2014) выполнен анализ преимущественно максимального стока на региональном уровне для рек Урала и Свердловской области, с акцентом на статистический анализ сезонной структуры стока и её пространственной дифференциации.

В 2016 г. В.Г. Калинин предложил новый методологический подход к исследованию ВГРС, а также рассматривал перераспределение долей стока по сезонам и влияние климатических изменений на него (2016, 2018, 2019, 2024).

В то же время, для территории водосбора Верхней и Средней Камы существуют две схемы гидрологического районирования, которые значительно отличаются друг от друга как по количеству выделенных таксономических единиц, так и по местоположению их границ. Первая схема районирования территории водосбора составлена А.С. Шкляевым (1966), в которой таксономические единицы выделены с учетом влияния местных условий на формирование речного стока. Вторая схема приведены в «Ресурсах поверхностных вод» (1973), выполненная на основе коэффициента стока и коэффициента естественной зарегулированности.

Зарубежные исследования и классификации формирования речного стока и его внутригодового распределения. В зарубежной гидрологической литературе *intra-annual distribution of streamflow* (ВГРС) изучается с использованием как традиционных статистических подходов (анализ многолетних гидрологических рядов, статистика, сезонные индексы), так и современных методов (*directional statistics*, тренд-анализ). Значимые исследования охватывают крупные речные системы и анализируют связь сезонности стока с климатическими факторами, гидрологическими особенностями бассейнов и антропогенными воздействиями, а также изменения сезонной структуры стока во времени в условиях климатических изменений.

В последние десятилетия наибольшее внимание уделяется трансформации ВГРС под воздействием климатических изменений. Это связано с наблюдаемыми смещениями сезонных максимумов, изменением доли снегового питания и усилением экстремальных гидрологических явлений (Berghuijs et al., 2014; Han et al., 2024; Wasko et al., 2022).

Исследования, выполненные для рек Европы, показывают, что сезонный сток в значительной степени определяется снеговым режимом и температурными условиями (Penna et al., 2014; Hanus et al., 2021; Salo et al., 2021; Beldring et al., 2021; Rasul et al., 2018; Yeste et al., 2014). Установлено, что весенний максимум стока традиционно формируется за счёт снеготаяния, однако в условиях современного потепления наблюдается его смещение на более ранние сроки (Hanus et al., 2021). Одновременно происходит снижение доли снегового питания и увеличение вклада дождевых осадков в формирование стока (Penna et al., 2014).

Дополнительным фактором является рост испарения, особенно в летний период, что приводит к уменьшению водности рек в меженный сезон (Yeste et al., 2014). В североевропейских странах отмечается изменение соотношения между осадками и стоком, что связано с повышением температуры воздуха и изменением фазового состояния осадков (Beldring et al., 2021). Антропогенные воздействия, в частности сельскохозяйственный дренаж, также оказывают значительное влияние на ВГРС (Salo et al., 2021). Таким образом, для водного режима рек Европы характерна тенденция к снижению весеннего стока и усилению летне-осенней межени.

Для рек Азии характерна высокая зависимость ВГРС от атмосферной циркуляции, прежде всего муссонных процессов (Aizen et al., 2021; Alkhadher et al., 2025; Dung et al., 2020; Hasson et al., 2013; Ji et al., 2021; Lu, 2009; Najibi, Devineni, 2018; Yokoo et al., 2009). Основной объём стока формируется в период интенсивных летних осадков, что обуславливает резкую сезонную неравномерность водного режима (Hasson et al., 2013). В то же время повышение температуры воздуха способствует увеличению испарения и снижению весеннего стока (Ji et al., 2021). Значительное влияние на гидрологический режим оказывают изменения землепользования, включая урбанизацию и развитие сельского хозяйства, которые усиливают внутригодовую изменчивость стока (Ji et al., 2021; Alkhadher et al., 2025). Исследования также показывают высокую пространственную неоднородность гидрологических процессов, связанную с различиями в климатических условиях, рельефе и типах почв (Yokoo et al., 2009). В целом для рек Азии характерна выраженная сезонность стока, обусловленная муссонным климатом, и высокая чувствительность гидрологических процессов к климатическим изменениям.

Для рек Северной Америки, чётко прослеживается тенденция перераспределения ВГРС под влиянием климатических изменений. Результаты исследований ряда авторов показали, что наблюдается смещение фаз водного режима, при этом уменьшается доля снегового питания вследствие сокращения запасов снежного покрова и ускорения процессов снеготаяния, что обуславливает сдвиг весеннего половодья и снижение устойчивости прогностических оценок водности. Для горных рек выявлена устойчивую тенденцию снижения летнего меженного стока (Barth et al., 2025; He et al., 2016; Rood et al., 2008).

Результаты исследований на территории Австралии и островов Тихого океана свидетельствуют о том, что для ВГРС свойственна значительная изменчивость, что обусловлено сильными климатическими изменениями,

включая чередование засушливых и влажных периодов (Ji et al., 2025; Peel et al., 2004). В результате наблюдаются резкие колебания водности рек и высокая частота экстремальных гидрологических явлений.

Развитие классификаций водного режима рек мира во второй половине XX века шло путём сочетания физико-географических подходов с количественным анализом гидрологических параметров, включая статистические методы и кластерный анализ и в некоторой степени основывалось на анализе российских и советских классификаций (Фролова и др., 2021).

Так, например, классификация Парде (1955) (Eds Musy, Higy, 2010) впервые объединила физико-географический и гидрологический аспекты, выделив три типа режима рек (простой, смешанный, сложный) с подтипами (гляциальный, нивальный, плювиальный) на основе высотного положения бассейнов и характеристик стока.

Классификация Института географии Бернского университета (1985) разделила гидрологический режим на 3 типа и 16 подтипов, учитывая среднюю высоту бассейна, площадь оледенения и статистические показатели; результаты оформлены в гидрологический атлас (Aschwanden, Weingartner, 1985).

Классификации на основе количественных параметров (вторая половина XX века) используют десятки характеристик стока, обрабатываемых статистическими методами (кластеризация, регрессионные модели, машинное обучение). Пример — исследование в США (1989), где по 78 водотокам выявили 9 типов режима – от прерывистого пересыхающего до реки с преимущественно подземным питанием (Poff, Ward, 1989).

Глобальная классификация B.L. Finlayson, T.A. McMahon (1988) на основе кластерного анализа среднемесячного стока (в % от годового) охватила 969 водных объектов и выделила 15 гидрологических районов; её ограничение — неполнота исходных данных, компенсированная климатическим подобием районов.

В последние три десятилетия гидрологические исследования перешли к масштабным региональным и глобальным классификациям водного режима рек, сочетающим количественный анализ многолетних данных с современными методами обработки (кластерный анализ, машинное обучение), учитывающим климатические связи и экологические параметры и опубликованы по различным районам Европы, США, Канады, Австралии и стран Африки (Allchin, 2015; Berhanu et al., 2015; Blöschl et al., 2019; Gharari et al. 2011; Kennard et al., 2010; Kuentz et al., 2017; Lane et al., 2016; Mackay et al., 2014;

Matti et al., 2017; McManamay et al., 2011; Merz et al., 2018; Sanborn et al., 2006; Sawicz et al., 2011).

Ключевым достижением стала глобальная классификация GloRiC (Dallaire, et al., 2019; URL: www.hydrosheds.org/page/gloric), объединившая сотни переменных и группирующая крупнейшие речные системы мира в 127 категорий на основе комплексной оценки гидрологических, климатических и экологических параметров.

Исследование факторов формирования весеннего половодья. Научный интерес к основным факторам формирования весеннего половодья возник в конце XIX – начале XX века. Так, например, в трудах Е.А. Гейнца (1898) и Д.И. Кочерина (1929) были впервые выделены основные факторы формирования весеннего стока, а также выявлено, что основные характеристики половодья (объем, максимальный расход, форма гидрографа, интенсивность роста) обусловлены двумя ключевыми факторами: количеством влаги, поступающим на водосбор, и процессами ее трансформации при движении к замыкающему створу.

Преимущественно до 40–х годов XX века закономерности формирования половодья изучались преимущественно в качественной форме (Рязанцев, Жердев, 1991).

В более поздних исследованиях Б.А. Аполлова, М.А. Великанова, Л.К. Вершининой, Е.С. Змиевой, Г.П. Калинина, В.Д. Комарова, Д.Л. Соколовского, А.М. Владимирова и других советских и российских гидрологов все факторы, участвующие в формировании половодья, были разделены на основные группы, при этом метеорологические факторы выделены как определяющие.

Фундаментальные основы темы были заложены в следующих трудах:

В работах А.В. Огиевского (1930-1950-е гг.), впервые был реализован системный подход к изучению главной фазы водного режима рек Восточной Европы, а также установлено, что величина весеннего половодья определяется главным образом запасами воды в снежном покрове, причём существенную роль при этом играет интенсивность снеготаяния.

М.А. Великанов (1957) подчёркивал ведущую роль снеготаяния и метеорологических факторов (температуры воздуха и осадков) в формирование половодья, а также отмечал важность свойств подстилающей поверхности, включая степень промерзания почвы и её водопроницаемость. В работе 1957 года было обосновано, что величина и форма гидрографа половодья зависят не только от объёма талых вод, но и от условий их трансформации в пределах водосбора, что

стало важным вкладом в развитие теории формирования речного стока.

Б.А. Апполов, Г.П. Калинин и В.Д. Комаров (1974) обосновали положение о том, что половодье представляет собой результат сложного взаимодействия климатических и бассейновых факторов. Важнейшим результатом исследований ученых стала разработка методов расчета и прогнозирования стока, при этом особое внимание уделялось значению характеристик водосбора (рельефа и почвенных условий) наряду с метеорологическими факторами.

Исследования Л.С. Кучмента, А.Н. Гельфана и Ю.Г. Мотовилова (1983, 1993) внесли существенный вклад в развитие представлений о формировании весеннего половодья в рамках физико-математического моделирования речного стока. В их работах половодье рассматривается как результат сложного взаимодействия процессов снеготаяния, инфильтрации и аккумуляции влаги в пределах речного водосбора. Учёные показали, что для корректного описания динамики половодья необходимо учитывать не только климатические факторы, но и внутренние гидрологические процессы, определяющие трансформацию талых вод при их движении по водосбору. Разработанные ими подходы способствовали переходу от эмпирических методов анализа к численному моделированию, что существенно расширило возможности прогнозирования весеннего половодья и оценки гидрологических рисков.

Ю.Б. Виноградов (1988) также рассматривал половодье как сложный результат комплексного взаимодействия климатических факторов (снегозапасов, температурного режима, осадков) и характеристик речного бассейна, включая рельеф, почвенные свойства и степень антропогенного воздействия. Особое внимание уделялось физически обоснованному моделированию процессов снеготаяния и формирования стока, что позволило повысить точность гидрологических расчётов и прогнозов. Подход Ю.Б. Виноградова способствовал развитию методов численного моделирования весеннего половодья и их практическому применению в задачах водного хозяйства и оценки гидрологических рисков.

В настоящее время исследованию процессов формирования весеннего половодья посвящено много работ как российских, так и зарубежных авторов.

Так, например, в статье Л.В. Переладовой (2001) дана оценка комплекса факторов, формирующих весенний сток половодья рек Тюменской области. Выявлено, что основные факторы, участвующие в формировании половодья – метеорологические. При этом изменчивость атмосферных осадков и температуры

воздуха не только в весенний, но и в весьма длительный предшествующий период являются главными факторами, влияющими на максимальный сток половодья.

В работе М.Б. Киреевой и Н.Л. Фроловой (2013) на основе данных о водном режиме рек бассейна Дона показаны изменения максимальных расходов воды, продолжительности половодья, доли стока за половодье в годовом стоке, формы гидрографа. Продемонстрировано, что изменение характера весеннего половодья тесным образом связано с изменением других фаз водного режима рек.

Особенности формирования максимального стока весеннего половодья, а также отклонения климатических параметров от средних значений описываются в работе П.С. Лопуха и И.С. Даниловича (2013). Авторами рассмотрены отклонения климатических параметров, вызванные изменениями в атмосферной циркуляции, которые определяют условия, формирующие речной сток и элементы водного режима (температура воды, толщина льда, даты наступления гидрологических сезонов и т. д.).

В работе А.В. Апухтина и М.В. Кумани (2015) рассмотрены современные процессы изменения стока весеннего половодья, а также описаны механизмы взаимодействия разнообразных гидрометеорологических факторов, приводящих к редукации слоя стока половодья на реках Курской области.

А.А. Зиновьев (2014) рассмотрел факторы, обуславливающие формирование весеннего половодья, такие как запасы воды в снежном покрове, атмосферные осадки в период снеготаяния и весеннего половодья, осеннее увлажнение почвы к началу снеготаяния, глубину промерзания почвы, ледяную корку на почве, зимние оттепели, интенсивность снеготаяния.

В статье С.А. Лаврова и И.Л. Калюжного (2016) выполнена оценка изменений характеристик весеннего половодья и факторов его формирования в бассейне Волги за период 1978–2010 гг. Выявлено, что сток весеннего половодья в основном определяют максимальные снегозапасы и осадки за период половодья. В качестве основных предикторов для долгосрочного прогноза весеннего половодья авторы предлагают использовать сумму осадков за зимний и весенний период, а также температуру воздуха зимой.

В.Н. Уржунцева и С.А. Гузеева (2017) выявили, что весеннее половодье зависит от высокого осеннего увлажнения почвы, накопления больших запасов воды в снежном покрове, позднего наступления весеннего потепления с резким подъемом температуры воздуха и значительного количества весенних осадков, увеличивающих суммарное поступление воды в период снеготаяния.

В работах А.О. Миннегалиева (2018) выполнена оценка зависимости средней продолжительности весеннего половодья на водотоках бассейна реки Белой от морфометрических характеристик водосборов и установлено, что продолжительность половодья зависит от площади, местоположения и уклона склонов водосбора.

Наиболее всестороннее освещение данный вопрос получил в исследованиях Н.А. Варенцовой и др. (2022, 2025). В кандидатской диссертации Н.А. Варенцовой (2025) установлен вклад более 200 характеристик в дисперсию стока: 14–17% изменчивости определяют текущие весенние процессы. Среди приходных факторов на ЕТР в 60% случаев лидирует сумма твердых осадков за зиму, в 30% – сумма зимних осадков, в 10% – запас воды в снежном покрове; различия парных коэффициентов корреляции достигают 0,3. Значимость влажности почвы максимальна в зоне недостаточного увлажнения, однако на фоне неустойчивых зим её величина перед установлением снежного покрова объясняет лишь 15% изменчивости стока, а перед началом половодья – до 20% (бассейны Дона, Нижней Волги, Белой, Урала). Температура воздуха и скорость таяния входят в половину уравнений речных водосборов, причём их роль возрастает к югу. Среди характеристик таяния значимы не только активная фаза, но и пассивное и общее таяние (например, пассивное преобладает в бассейне Дона, общее – на Верхней Волге, Оке и Вятке), тогда как на востоке и севере ЕТР больший вес имеют оттепели, а в правобережье Дона, на юге Урала и Вятке – глубина промерзания почвы. В зоне недостаточного увлажнения продолжительность залегания снега, характерные даты и зимняя температура теснее связаны со стоком, чем классические приходные составляющие. Выявлена значительная пространственная пестрота первой триады факторов, отсутствие единых для ЕТР доминант и даже внутриводосборная изменчивость; например, выделены районы доминирования влажности почвы (Нижняя Волга, Нижняя Кама, Белая, Хопёр, верхний Урал) и глубины промерзания (бассейн Дона). Для зоны недостаточного увлажнения условия подачи влаги к поверхности почвы весной значимее объёма водоподдачи, вследствие чего в статистических уравнениях приходные составляющие могут отсутствовать. Впервые выполнено районирование ЕТР по факторам формирования стока половодья: выделено 11 районов по главному фактору и 25 подрайонов по второстепенному.

Оценка определения водности весеннего половодья и года в целом. В России (и ранее в СССР) прогнозирование речного стока и главной фазы водного

режима сформировалось как самостоятельное направление гидрологии, развивавшееся в рамках научных школ и государственной системы наблюдений. Ключевую роль в оперативном и сезонном прогнозировании играет Росгидромет и его научная база – Государственный гидрологический институт, где разрабатываются ежегодные оценки водности, включая прогнозы половодья на основе данных о снегозапасах, осадках и гидрометеорологических условиях.

Теоретические и методические основы прогнозирования были заложены представителями советской гидрологической школы, среди которых значимый вклад внесли Б.А. Апполов и др. (1974), Н.Ф. Бефани, Г.П. Калинин (1983), Д.А. Бураков (1976, 1978), М.А. Великанов (1957), Л.К. Вершинина, и др. (1985), Е.С. Змиева (1964), В.Д. Комаров (1947, 1959), Л.С. Кучмент и др. (1983, 1990), А.Н. Гельфан (2007), Е.Г. Попов (1968), А.А. Харшан (1970), и др., развивавшие подходы к оценке и долгосрочному прогнозу водных ресурсов. В практике используются воднобалансовые, статистические и физико-математические методы.

Для решения гидрологических задач и предотвращения опасных явлений, на сегодняшний день актуальностью пользуются расчеты в виде прогноза весеннего половодья и его основных характеристик. Прогнозирование осуществляется с помощью различных методик на основе достаточного объема данных о факторах формирования половодья.

Существенным вкладом в развитие и актуализации методик стали работы С.В. Борща и др. (2016, 2017, 2022), С.В. Борща, А.В. Христофорова (2015), Ю.А. Симонова и др. (2016, 2021), Ю.М. Георгиевского, С.В. Шаночкина (2007), А.Н. Гельфана, В.М. Морейдо (2014, 2015), Б.И. Гарцмана и др. (2019), Б.И. Гарцман и др. (2023), В.М. Морейдо (2017, 2020) и др.

В настоящее время при составлении прогноза стока весеннего половодья, в основном, упор ставится на применении разнообразных моделей формирования речного стока, основанных на расчетах снеготаяния и поступления воды с водосбора в речную сеть (Кучмент, Гельфан 2000, 2004, 2010; Мотовилов, Гельфан, 2018; Яковченко, 2006; Бураков, Иванова, 2010; Пьянков, Шихов, 2017, 2019, 2021; Симонов и др., 2016; Калинин, Шайдулина, 2022).

На текущий момент выполнено значительное количество исследований, посвященных как разработкам методик по прогнозу боковой приточности рек, так и анализу моделей формирования речного стока, а также их применению для долгосрочного прогноза притока воды в водохранилища таких как Цимлянское,

Красноярское, Богучанское, Токтогульское, Саяно-Шушенское, Усть-Хантайское, Бурейское, Енисейских ГЭС и др. (Бураков и др., 1991, 2003; Бураков, Адамович, 2006; Борщ и др., 2016, 2017, 2022; Виноградова, Иванова, 2001; Гарцман и др., 2019; Кисельников и др. 2018; Карамолдоев, Калашникова, 2012; Морейдо, 2012)

В работе Б.М. Беляева, Н.А. Варенцовой (2018), на примере разработанных авторами методик долгосрочного гидрологического прогноза весеннего половодья, рассмотрены особенности, эффективность, возможности и перспективы статистического подхода и ансамблевого моделирования в современных вопросах гидрологического прогнозирования. В основе – статистическая методика прогноза максимальных уровней воды малых рек бассейна Верхней Волги.

Климатические изменения вносят существенные коррективы в ранее разработанные методики прогноза, в связи с чем их точность и оправдываемость резко снижаются. Поэтому разработка актуальных методик прогноза для малых и средних рек является важной научной задачей. В работе А.А. Семенов и М.Е. Буковского (2022) рассмотрены 17 климатических факторов, потенциально влияющих на формирование максимальных уровней весеннего половодья. Авторами установлено, что в наибольшей степени вероятность наступления высоких половодий увеличивается при смещении дат начала снеготаяния к более поздним. Также вероятность высоких половодий возрастает с увеличением запасов воды в снеге, осеннего увлажнения почво-грунтов, более поздним переходом средней суточной температуры воздуха через 0°C в сторону повышения.

Методики долгосрочного прогноза притока воды в Камское водохранилище были разработаны в 60-70-х годах XX века. Так, в 1967 г. Н.Д. Лебедевой (1967) разработана методика долгосрочного прогноза объёма весеннего притока к Камскому водохранилищу с заблаговременностью до 25 суток. Данная методика не была внедрена в оперативную практику для выпуска гидрологических прогнозов. Выпуск долгосрочных прогнозов притока воды в Камское водохранилище осуществляет ФГБУ «Уральское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» по методике Государственного гидрологического института, разработанной в 1974 г. В основу этой методики легли исследования Е.И. Соколова (1940), Т.Т. Макаровой (1955) и Н.Д. Лебедевой (1959, 1967).

Пермский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ПЦГМС) выпускает только краткосрочные прогнозы (заблаговременность до 6 сут) притока воды к Камской ГЭС на основе методики Н.Д. Лебедевой, в основу которой входит учет максимальных снегозапасов, осадков и характеристика увлажнённости бассейна. Слой стока рассчитывается по схеме с применением температурных коэффициентов, для условий рек водосбора Камского водохранилища.

Выводы:

Речной сток является результатом взаимодействия сложного комплекса процессов, составляющих наземную часть круговорота воды в природе. Формирование стока складывается из большого числа частных процессов, локализованных в границах речных бассейнов.

Существуют группы факторов, влияющих на формирование речного стока: климатические факторы, метеорологические и факторы речного бассейна. Климатические факторы являются главными в определении типа водного режима и внутригодовом распределении стока.

Обзор литературных источников позволил сделать вывод о том, что исследованию особенностей ВГРС посвящено большое количество работ. С середины XX в. началось активное исследование ВГРС, при этом разработаны ряд схем районирования на основе деления рек по источникам питания, генетического расчленения гидрографа и др., в которых выделены однородные по климатическим условиям и геолого- геоморфологической структуре обширные территории. Однако в этих схемах районирования не были отражены особенности формирования внутригодового распределения стока на водосборах средних и малых рек в особенности в разные по водности годы.

Формирование весеннего половодья на сегодняшний день изучено достаточно полно. Для многих водосборов детально разработаны методики прогноза, касающиеся формирования весеннего половодья, получены уравнения и расчеты, позволяющие спрогнозировать основные характеристики половодья. Однако в настоящее время при составлении прогноза стока весеннего половодья, в основном, упор ставится на применении разнообразных моделей формирования речного стока, основанных на расчетах снеготаяния и поступления воды с водосбора в речную сеть. Тем не менее, наиболее применимы в практике прогноза

остаются классические подходы и расчеты, основанные на упрощенном представлении процессов формирования стока, зарекомендовавшие себя как надежные методы.

Несмотря на значительное количество исследований в настоящее время отсутствуют подходы в комплексном исследовании ВГРС и его главной фазы водного режима. Оценка стока за период весеннего половодья для водосбора Верхней и Средней Камы по настоящий момент выполняется с использованием методов, разработанных еще в середине XX в., которые с тех пор не совершенствовались. Таким образом, актуальность диссертационного исследования определяется необходимостью получения новых знаний о региональных условиях и закономерностях формирования внутригодового распределения стока рек и главной фазы водного режима. Это будет основой для разработки новых методов и подходов по оценке формирования стока и водности, позволяющей рассматривать проблему комплексно, во взаимосвязи её отдельных частей.

ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОСБОРА ВЕРХНЕЙ И СРЕДНЕЙ КАМЫ, ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Физико-географическая характеристика исследуемой территории

Географическое положение и рельеф. Исследуемая территория – общей площадью 184240 км², охватывает бассейн Верхней и Средней Камы и расположена на северо-востоке Европейской части России (рис. 2.1).

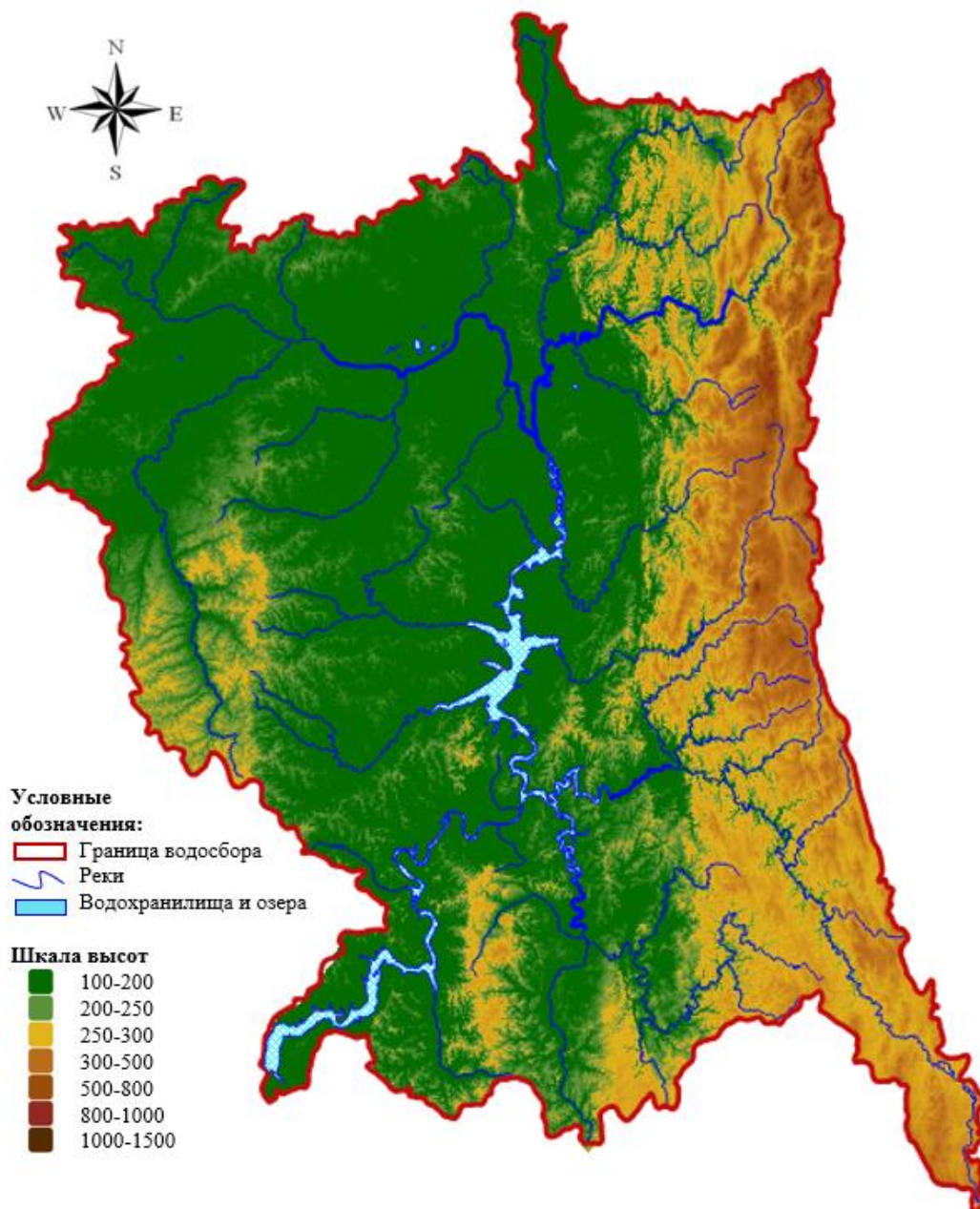


Рис. 2.1. Водосбор Верхней и Средней Камы

Протяженность с севера на юг составляет 640 км – от 61° 57' с.ш. до 56° 05' с.ш., а с запада на восток около 530 км от 51° 35' в.д. до 60° 27' в.д. Около

80,5% водосборной площади приходится на Пермский край (Калинин, 2014). Крайняя северная часть бассейна расположена на территории республики Коми, западная – на территории Удмуртии и Кировской области, а юго-восточная – в Свердловской области.

Правобережная часть водосбора находится на Русской равнине, левобережная – в предгорьях и на западном склоне Уральских гор (Ресурсы...,1973). В целом водосбор представляет собой всхолмленную равнину (70%), повышающуюся с запада на восток, где характерной особенностью рельефа являются западные хребты Уральской горной страны (30% общей площади) (рис. 2.1). Наибольшие высоты горной части водосбора составляют 1000-1500 м, равнинной – 300-400 м (Гвоздецкий, 1968).

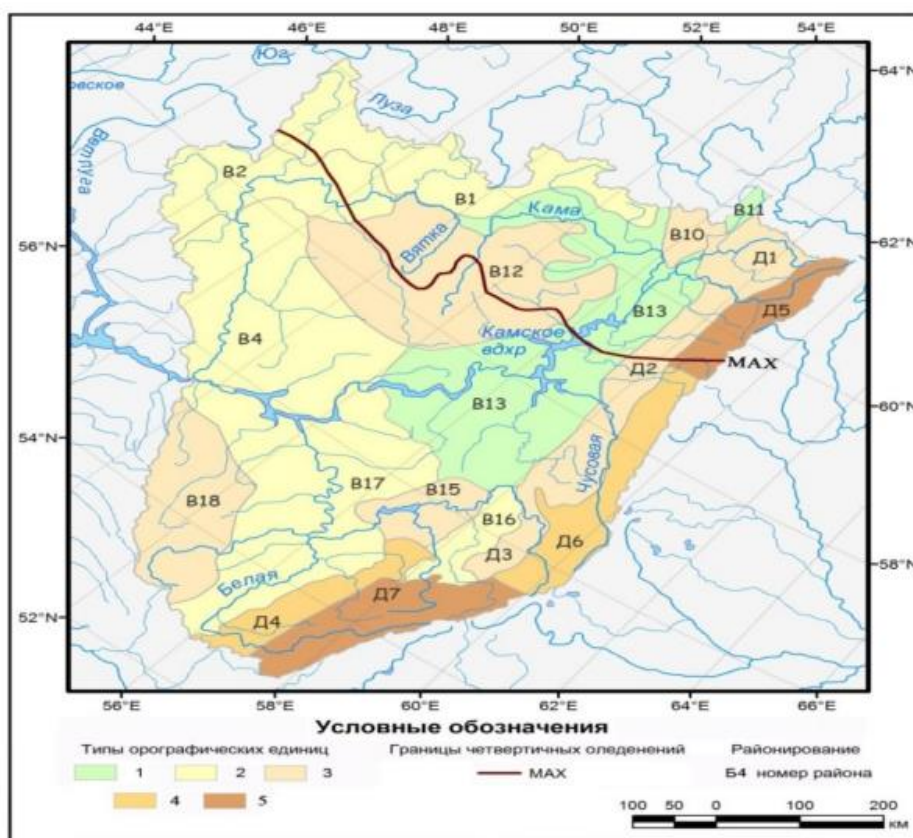


Рис. 2.2. Орографические районы Камского бассейна (Георгиевский, 2015)

Согласно орографическому районированию (рис. 2.2), приведенному в научно-прикладном справочнике основных гидрологических характеристик рек бассейна Камы (Георгиевский, 2015), на равнинной территории водосбора расположены: Северные Увалы (B1); Верхнекамская возвышенность (B12); Низменности верхней и средней Камы (B13); Южный Тиман (B10); Южнопечорская низменность (B11); Область парм (D1); Вишерско-Чусовское Предуралье (D2); Среднегорье Северного Урала (D5); Низкогорье Среднего Урала (D6).

Геологическое строение. Территория водосбора лежит на стыке Восточно-Европейской платформы и западных склонов Уральского складчатого пояса. Это переходная зона с осложнённым строением: на западе – относительно плоская платформа с осадочным чехлом, на востоке – обнажённые или слабо покрытые коренные породы Урала.

В Геологическом строении исследуемой территории принимают участие архейские, протерозойские, палеозойские, мезозойские и кайнозойские образования. Все они, за исключением архейских и протерозойских, выходят на поверхность (Наливкин, 1949; Софроницкий, 1959).

Основная направленность геоструктур – меридиональная (с севера на юг) для тектонических линий и складчатости Урала, но в пределах бассейна она сглажена и преобразована более поздней осадочной и денудационной историей. *Кристаллический фундамент и палеозойские отложения:* в приуральской части встречаются кристаллические и метаморфические породы (гнейсы, кристаллические сланцы, местами гранитоиды и другие интрузивы), характерные для Урала. Над фундаментом залегают палеозойские отложения: ордовик-девон-карбон-пермские серии – песчаники, алевролиты, сланцы, известняки и конгломераты. В речной сети эти породы обнажаются в пределах небольших оголений и контактных зон. *Четвертичный покров и современные отложения:* повсеместно покрытие представлено четвертичными отложениями: ледниковые (там, где доходили оледенения), элювиально-делювиальные и размывно-аллювиальные отложения. Типичные элементы: суглинки, супеси, пылеватые суглинки, пески и гравийные отложения. В поймах и заливных лугах располагаются мощные наносные толщи аллювия (песчано-иловые, торфяные залежи в низинах). Торф и торфянистые отложения широко развиты в пойменных и заболоченных частях водосбора. Террасный рельеф рек (многоступенчатые речные террасы) типичен для Камы и её притоков; террасы сложены песками и гравием с примесью суглинков.

Геологическое строение водосбора оказывает влияние в основном на внутригодовое распределение стока, что особенно заметно в районах распространения легкорастворимых пород (гипсы, ангидриты, известняки), где широко развит карст (Софроницкий, 1959).

На территории водосбора находятся Печорская и Уфимско-Соликамская карстовые области, а также Колво-Вишерский, Коонофоновско-Ныробский, Полазненско-Шалашинский, Сылвинско-Сергинский карстовые районы.

Карстующиеся породы, поглощая атмосферные осадки, задерживают их в пустотах, образованных в результате растворения сульфатных и карбонатных пород. Летом многочисленные карстовые источники понижают температуру поверхностных водоемов, а зимой повышают ее. Подземные воды способствуют быстрой подготовке формирования и разрушения ледяного покрова и в местах их выхода сдвигают сроки в раннюю сторону. Влияние карста испытывают реки, относящиеся к водосборам Колвы, Вишеры, Пильвы, Яйвы, Косьвы, Усьвы, Чусовой, Сфлвы, Ирени и некоторых их притоков (Горбунова и др., 1992).

Климат. Положение водосбора в центре материка Евразии определяет резко континентальный характер его климата, выражающийся в больших колебаниях температуры воздуха как внутри года, так и в течение суток. Наряду с этим велико влияние на климат Урала морских воздушных масс, несущих влагу с Атлантического океана.

Особенности рельефа территории обуславливают наличие хорошо выраженной широтной зональности в изменении климата на равнине и вертикальной поясности в горах Урала. Многоснежная суровая зима и короткое прохладное лето на севере, малоснежная морозная зима и сравнительно жаркое лето в районах крайнего юга – таковы основные различия климата по широте (Калинин, 2014).

Температура воздуха. Средняя годовая температура воздуха равнинной части бассейна р. Камы изменяется с севера на юг от 0 до 3°C. В горных районах с увеличением высоты местности над уровнем моря наблюдается понижение температуры на 0,5-0,7°C на 100 м. В холодный период градиент температуры меньше, чем в теплый, во многих случаях под влиянием местных особенностей рельефа имеют место температурные инверсии, т.е. наблюдается рост температуры воздуха с высотой. В среднем за год температура воздуха ниже на вершинах гор и в пониженных формах рельефа. Самый холодный месяц – январь. Средняя температура воздуха в январе повышается с севера на юг, составляя в бассейне р. Камы от -17 до -14°C. Абсолютные минимумы температуры воздуха приходятся на декабрь-февраль -45, -48°C. В отдельных горных районах территории вследствие их микроклиматических особенностей возможны более низкие абсолютные минимумы температуры воздуха.

Переход среднесуточной температуры через -5°C весной обычно происходит во второй половине марта. Переход среднесуточной температуры

воздуха через 5°С на юге территории происходит 18-20 апреля, на севере – в среднем 5 мая, в горах он запаздывает на 5-10 дней, а на отдельных высоких вершинах почти на месяц.

Самый теплый месяц – июль. Средняя температура воздуха в июле на севере района равна 16-17°С, а на юге превышает 19°С. Устойчивый переход через 5°С осенью происходит в конце сентября – начале октября. В бассейне р. Камы переход через 5°С наблюдается 25 сентября на севере и 10 октября на юге. Переход средней суточной температуры воздуха через 0°С на севере района наступает в первой половине, а на юге во второй половине октября. С переходом средней суточной температуры через -5°С обычно совпадает образование устойчивого снежного покрова. Зима длится около 5 месяцев.

Зимние оттепели явление редкое и весьма кратковременное. Температура воздуха выше 0 °С удерживается, как правило, только в дневное время в течение нескольких часов, что не обеспечивает условий для снеготаяния (Ресурсы...,1973).

Атмосферные осадки. В центральной части Уральских гор, в северной гористой местности, годовое количество осадков колеблется от 800 до 900 мм, в то время как в южной низменности – от 600 до 700 мм. На Южном Урале амплитуда колебаний осадков особенно заметна. На вершинах гор, достигающих высоты 800-1000 м, количество осадков доходит до 1200-1500 мм, а на равнинных территориях Предуралья – лишь 500-600 мм.

В течение года осадки распределяются неравномерно. Наибольшая часть – от 60 до 70% от общего годового количества – приходится на теплый сезон. В бассейне реки Камы количество осадков, выпадающих летом, в 1,4-1,7 раза превышает количество зимних осадков. Максимальное количество отмечается в горах Северного и Южного Урала составляет 500-450 мм. На остальной территории бассейна реки Камы количество осадков уменьшается с севера на юг, от 250 до 200 мм, незначительно превышая верхний предел в районах Верхнекамской возвышенности и Сылвенского кряжа (Ресурсы...,1973).

Снежный покров. Начало формирования снежного покрова на территории водосбора отмечается в северных горных областях – в сентябре, в предгорьях – в середине октября, а к концу октября – на всей остальной площади. Как правило, первый выпавший снег тает. Стабильный снежный покров формируется в конце октября – начале ноября. На открытых участках толщина снежного покрова

заметно меньше, чем в лесных массивах или в местах, защищенных от ветров. Наибольшее накопление снега обычно происходит незадолго до начала весеннего таяния.

Объемы воды, содержащиеся в снеге бассейна реки Камы, уменьшаются в направлении с севера на юг, варьируясь от 200 до 100 мм. Наибольшие запасы воды, превышающие 400-300 мм, отмечаются в горной и лесистой частях региона.

Таяние снега обычно начинается с приходом положительных температур в дневное время, еще до устойчивого перехода среднесуточных температур через 0°C, и наблюдается в третьей декаде марта и продолжается от 15 до 20 дней на равнинной местности, а в горных районах – более 25 дней. Процесс таяния снега протекает неравномерно, особенно в горных районах. На юге равнинной части стабильный снежный покров сходит к 10-15 апреля, а к 20-25 апреля происходит разрушение снежного покрова в северной половине территории, в горной части – в начале мая (Ресурсы...,1973).

Почвы. На территории водосбора преобладают подзолистые почвы (около 78%) которые распространены на песчаных и супесчаных склонах, под хвойными и бедными по питанию лесами, особенно в верхней и средней части водосбора. В свою очередь, подзолистые почвы делятся на типично подзолистые (38%) в северной части водосбора и дерново-подзолистые (40%) в центральной и южной частях водосбора. Такие почвы характеризуются слабой плодородностью, кислотатостью, с низким содержанием органики в пахотном горизонте.

На более глинистых и суглинистых плато, под смешанными лесами и на пологих местах встречаются серые лесные (дерново-слабоподзолистые, серо-лесные суглинки). Такие почвы обладают лучшей плодородностью по сравнению с подзолистыми, пригодны для пашни и кормовых культур при адекватной мелиорации; склонны к уплотнению и временному заболачиванию в понижениях.

В поймах рек распространены аллювиальные и луговые почвы (глеевые, лугово-аллювиальные). Почвы обладают высокой плодородностью в верхней части профиля, но подвержены затоплению, при длительном заливе возникают редуционные процессы, происходит выделение метана и накопление органики.

По механическому составу почвы делятся на тяжелые (глинистые, суглинистые) и легкие (песчаные). В большей части региона преобладают плотные виды почв, а рыхлые встречаются преимущественно в северной зоне. В восточной, гористой местности, на возвышенностях и холмах можно найти горно-луговые почвы. Покровные и лёссовидные суглинки занимают значительные

территории водоразделов и речных террас. Озёрно-болотные отложения, такие как глины, торфяные залежи и сапропели, покрывают обширные участки поймы и надпойменной террасы (Коротаяев, 1962).

Растительность. Основным типом растительности на водосборе являются леса, занимающие около 85% территории. Особенно лесисты северная и восточная части, к югу и западу залесенность снижается. С.Ф. Николаев (1959) выделял темнохвойные, мелколиственные и широколиственные леса. Наиболее распространены темнохвойные леса (ель, пихта). От севера к югу четко проявляется влияние широтной зональности. На северо-востоке территории распространена кедровая сосна, а в восточной части лиственница. Елово-пихтовые леса располагаются крупными массивами на севере бассейна, местами располагаются сосна, береза, осина. Почву покрывают мхи, так как травяной покров плохо развит. Примерно 5% территории занимает болотная растительность.

Гидрографическая сеть. На территории водосбора гидрографическая сеть развита равномерно и представлена постоянно действующими реками, временными водотоками, озерами, болотами, водохранилищами и прудами (рис 2.3). В среднем на 1 км² площади приходится около 250-350 м речных русел длиной более 10 км. Коэффициенты густоты речной сети изменяются с севера на юг от 0,7-0,8 до 0,4-0,5 км/км² (Матарзин, Шкляев, 1959; Островский, 1966).

Основной рекой на рассматриваемой территории является р. Кама и созданные на ней два крупных водохранилища: **1) Камское водохранилище** расположено на северо-востоке Европейской части России и является первой ступенью каскада на реке Кама, ниже которого расположены Воткинское и Нижне-Камское водохранилища. Практически полностью его водосбор расположен на территории Пермского края. Площадь водного зеркала водохранилища при НПУ составляет 1 915 км², объём водной массы – 12,2 км³, длина 250 км с севера на юг, максимальная глубина водохранилища составляет 30 м, средняя ширина – 5,5 км, с максимальным значением 14 км. Площадь водосбора Камского водохранилища составляет 168000 км² (ПИВР, 2016).

Водохранилище принимает сток рек Камы, Вишеры, Чусовой, Сылвы, Иньвы, Косьвы, Обвы, Яйвы и осуществляет сезонное, недельное и суточное регулирование стока, наполняясь весной после таяния снега. Водотоки бассейна Воткинского водохранилища относятся к равнинным рекам с чётко выраженным весенним половодьем, летне-осенними дождевыми паводками и продолжительной зимней меженью. Внутригодовое распределение стока в целом

водохранилища составляет 16000 км. Площадь водного зеркала водохранилища при НПУ составляет 1120 км², объём водной массы – 9,4 км³, длина 365 км, максимальная глубина водохранилища не превышает 28 м, средняя ширина составляет 8,4 м (ПИВР, 2016).

Водный режим рек на территории водохранилища разнообразен по своему характеру. Левобережные притоки Камы, берущие начало на склонах Урала (Вишера, Яйва, Косьва, Чусовая и др.), в верховьях текут вдоль меридионально расположенных горных хребтов, имеющие широкие долины, течение спокойное. При изменении направления на западное, реки перерезают горные хребты и гряды предгорий. Долины сужаются, скорость течения увеличивается, появляются пороги и перекаты. При выходе на равнину долины расширяются, русла становятся сильно извилистыми, с небольшими скоростями. Реки, берущие начало на Верхне-Камской возвышенности (Коса, Иньва, Обва), реки южных и юго-западных районов протекают в широких, с террасированными склонами, долинах. Русла рек извилистые, течение спокойное (Матарзин, 1959).

Озера и болота на территории распространены слабо. Основной тип озер – пойменные, реже встречаются карстовые. Располагаются обычно группами, в местах расширения долин. Наиболее крупные озера расположены в низинах северной части водосбора (Большой Кумикуш – 17,4 км², Чусовское – 19,4 км²) (Назаров, 2006). Общее количество прудов – 1286, с суммарной площадью 127,1 км² (Пьянков, Калинин, 2014).

2.2. Особенности водного режима рек водосбора

Реки исследуемой территории относятся к типу рек с четко выраженным весенним половодьем, летне-осенними паводками и длительно устойчивой зимней меженью. Снеговые воды являются главным источником в питании рек. Доля талых вод в суммарном стоке рек достигает 85-90% в южных лесостепных районах и 60-65% в горных частях территории, при этом велика и роль дождей (до 40%). Около 25-35% годового стока формируются подземным путем (Ресурсы...,1973).

Согласно классификации П.С. Кузина (1960), реки исследуемой территории по преобладающему источнику питания и типу водного режима относятся к группе рек с весенним половодьем и паводками (подтип Па1).

По схеме В.Г. Андреева (1960) данная территория относится ко второй зоне

со следующими границами сезонов: весна IV-VI, лето-осень VII- XI, зима XII-III. Однако, как показывают исследования ученых Пермского университета, особенности географического положения рассматриваемой территории и наличие вертикальной поясности в распределении основных климатических факторов в горной части водосбора «вносят» изменения в указанные границы сезонов. Для рек водосбора они приняты следующими: весна IV-VI, лето-осень VII-X, зима XI-III.

Весеннее половодье обычно начинается в апреле, на севере территории и в горной части – во второй половине месяца, а на юге в первых числах апреля. Амплитуда колебаний сроков начала весеннего подъема – в среднем около месяца. Длительная продолжительность половодья характерна для больших по площади водосборов рек до 100-115 суток. В горных районах период половодья больше чем на равнине, это связано с затяжным характером снеготаяния из-за не равномерного перехода температуры через 0°C к положительным значениям в разных высотных поясах (Ресурсы..., 1973).

На горных реках, а также северных районах равнины, половодье имеет многопиковую форму за счет прерывистого снеготаяния (в основном в горах), и дождевых подъемов, накладывающихся на снеговой сток. На равнине в пределах лесной зоны наряду с многопиковыми половодьями наблюдаются и однопиковые половодья, типичных для рек южных лесостепных районов. Амплитуда колебаний уровня воды в период половодья сильно меняется погодой и по территории. Интенсивность подъема в среднем составляет 10-15 см в сутки на малых реках, 20-30 см на более крупных реках (Ресурсы..., 1973).

Летне-осенняя межень. На реках лесостепной зоны наблюдается устойчивое стояние уровня воды и слабое изменение водности в течение летне-осеннего периода. Дождевые подъемы здесь очень незначительны и не ежегодны. В лесной зоне равнинной части паводки являются более обычным явлением. Наблюдаются они не ежегодно, но характеризуются более высокими подъемами уровня воды. В среднем на этой зоне наблюдаются 1-3 паводка. В южных лесостепных районах продолжительность устойчивой межени в среднем 10-150 дней, в лесной зоне 70-120 дней. По мере увеличения размеров рек межень приобретает более устойчивый характер, дождевые подъемы снижаются, и по высоте значительно уступают половодью.

Вследствие особенностей внутригодового режима рек самые низкие уровни воды за год наблюдаются, как правило, в конце лета. При этом в зимний сезон, несмотря на малую водность, уровни оказываются несколько выше летних из-за

подпора, связанного с процессами ледообразования. Многолетняя амплитуда колебания уровня воды меняется в широких пределах – у малых водотоков ее величина от 1 до 4 м, на средних реках от 3-4 до 8-10 м (Ресурсы...,1973).

Зимняя межень. Отличается устойчивостью, и большой продолжительностью 140-160 дней и низким стоком. Доля зимнего стока составляет в среднем 14% годового стока. При этом с переходом температуры через 0°C совпадают как начало этого периода (прекращение поверхностного стока, переход реки на подземное питание), так и окончание (начало весеннего снеготаяния и увеличение расходов воды на реке) (Комлев, 2002).

С начала ледообразования водность рек быстро снижается, в северных районах минимум обычно наступает в марте, а в более южных районах в феврале. Ход уровней в зимний период обычно не соответствует плавному изменению водности рек. В начале зимы для многих рек данной территории характерны зажорные подъемы уровня воды, и периодические его повышения, связанные с образованием наледей. Весной нередко наблюдаются заторные подъемы (Ресурсы...,1973).

2.3. Характеристика исходных данных

Для выявления закономерностей формирования внутригодового распределения стока на реках водосбора Верхней и Средней Камы и его главной фазы водного режима, за многолетний период были собраны исходные данные наблюдений по гидрологическим и метеорологическим элементам.

При выборе исходной гидрологической информации была сформирована база данных по 49 гидрологическим постам (г/п) на исследуемой территории, охватывающая многолетний период с момента создания гидрологических постов по 2022 г.

Данные ежедневных, среднемесячных и среднегодовых расходов по выбранным г/п, были собраны из разных информационных источников таких как:

- до 1965 гг. из приложения Ресурсов поверхностных вод СССР (Средний Урал и Приуралье) (Ресурсы..., 1973);
- с 1966 по 1975 гг. из изданий Основных гидрологических характеристик (Средний Урал и Приуралье, Кама);
- с 1976 по 1980 гг. из Многолетних данных о режиме и ресурсах поверхностных вод и суши бассейна р. Камы;

- с 1981 по 1985 гг. из Гидрологических ежегодников (Бассейн Каспийского моря, 1956-1985);
- с 1986 по 2007 гг. из архивных данных Пермского ЦГМС;
- с 2008 по 2022 гг. из онлайн базы данных Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации Федерального агентства водных ресурсов (АИС ГМВО, 2021).

Основные морфометрические характеристики рек – площади, средние высоты и уклоны их водосборов, а также уклоны главных водотоков, приведены из монографии В.Г. Калинин, С.В. Пьянков (2010). Список используемых в работе гидрологических постов и их месторасположение представлены на рисунке 2.4 и в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Список гидрологических постов на реках водосбора Верхней и Средней Камы

№ п/п	Река – пункт	Площадь водосбора, км ²	Ср. высота водосбора, м абс.	Общий период наблюдений
1	Кама – Ширяевский	5030	250	1948 - 1987
2	Кама – Волосницкое	9750	233	1930 -1987
3	Кама – Гайны	27400	191	1931 - дейст.
4	Кама – Бондюг	46300	188	1911 - дейст.
5	Весляна – Оньл	7100	185	1950 - 1992
6	Коса – Коса	6340	183	1956 - дейст.
7	Лолог – Сергеевский	1600	191	1964 - дейст.
8	Пильва – Усть-Кайб	1870	178	1958 - 1986
9	Уролка – Пашиб	1700	166	1965 - 1987
10	Вишера – Митраково	9050	446	1902 - дейст.
11	Вишера – Рябинино	30900	316	1930 - дейст.
12	Язьва – Нижняя Язьва	5840	287	1961- дейст.
13	Колва – Петрецово	2830	267	1928 - 2011
14	Колва – Камгорт	12600	260	1971 - 1987
15	Березовая – Булдырья	3030	296	1931 - 1993
16	Яйва – База	3630	365	1962 – 2004

Продолжение таблицы 2.1

№ п/п	Река – пункт	Площадь водосбора, км ²	Ср. высота водосбора, м абс.	Общий период наблюдений
17	Яйва – Усть-Игум	5700	322	1970 - дейст.
18	Кондас – Ощепково	896	162	1956 - дейст.
19	Иньва – Кудымкар	2050	206	1936 - дейст.
20	Иньва – Слудка	5210	187	1957 - дейст.
21	Кува – Кува	278	228	1952- дейст.
22	Велва – Ошиб	836	191	1933 - дейст.
23	Косьва – Большая Осяна	2950	534	1944 - 1978
24	Косьва – Останино (Перемское)	6220	398	1932 - дейст.
25	Обва – Карагай	4310	197	1931 - дейст.
26	Обва – Рождественское	5510	190	1957 - 1987
27	Сива – Сива	759	205	1978 - 1984
28	Чусовая – Косой Брод	731	414	1942 - дейст.
29	Чусовая – Староуткинск	5450	386	1939 - дейст.
30	Чусовая – Кын	10400	368	1952 - дейст.
31	Чусовая – Лямино	21500	363	1957 - дейст.
32	Сулем – Галашки	294	440	1948 - 1982
33	Серебряная – Серебрянка	894	385	1954 - дейст.
34	Койва – Кусье-Александровский	1790	371	1964 - 1974
35	Койва – Медведка	93	501	1970 - 1989
36	Усьва – Усьва	2170	458	1932 - дейст.
37	Вижай – Пашия	788	394	1965 - 1987
38	Сылва – Шамары	2350	321	1939 - дейст.
39	Сылва – Подкаменное (СЫЛВИНСК)	19700	246	1936 – 2011; 2011-дейст.
40	Вогулка – Шамары	969	334	1952 - дейст.
41	Иргина – Шестаково	1150	289	1973 - 1991
42	Барда – Синюшата	1910	242	1954 -1987
43	Ирень – Шубино	6060	227	1934 - 1991
44	Бабка – Балалы	1980	238	1933 - 1979
45	Гайва – Плотинка	306	163	1978 - дейст.
46	Мулянка - Субботино	336	162	1976 - дейст.
47	Очер – Казымово	1190	180	1975 - дейст.
48	Тулва – Барда	1890	218	1937 - дейст.
49	Вильва – Нововильвенский	341	537	1981 - дейст.

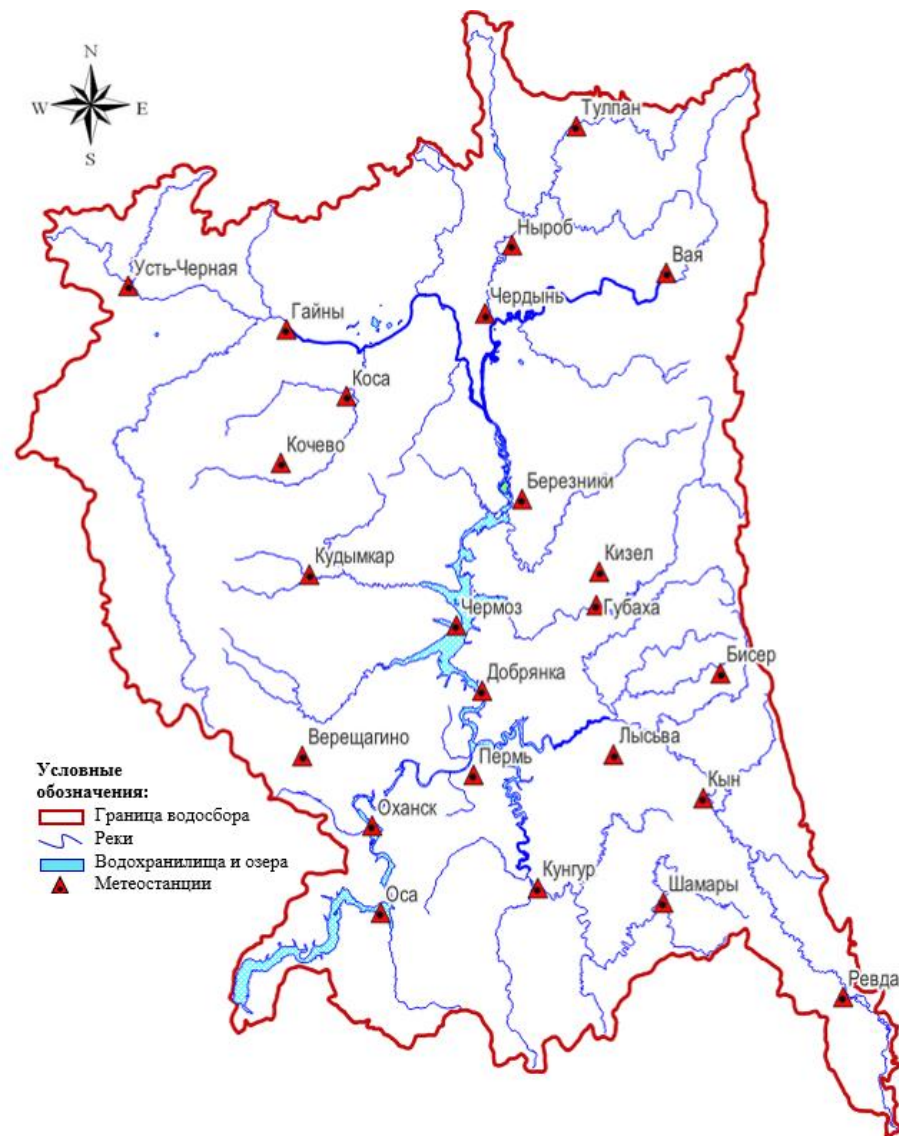


Рис. 2.4 Схемы расположения гидрологических постов и метеорологических станций

Дополнительно по ближайшей к гидрологическому посту метеорологической станции из ежемесячников были собраны данные о среднесуточной температуре воздуха, атмосферных осадках и величине запаса воды в снеге на период начала снеготаяния. Величины максимальных снегозапасов использованы как по некоторым гидрологическим постам, где проводятся измерения, так и по метеостанциям. В работе были использованы данные по 24-м действующим метеорологическим станциям, список которых представлен в таблице 2.2, месторасположение – на рисунке 2.4.

Таблица 2.2

Список метеорологических станций

№ п/п	Индекс ВМО	Метеостанция	Высота метеостанции, м абс.	Период наблюдений
1	23815	Тулпан	202	1931 - дейст.
2	23912	Ныроб	172	1889 - дейст.
3	23913	Вая	183	1930 - дейст.
4	23905	Усть-Черная	181	1954 - дейст.
5	23914	Чердынь	208	1847- дейст.
6	23909	Гайны	196	1889, 1891-1896, 1913-1917, 1929- дейст.
7	28013	Коса	181	1885, 1898, 1933- дейст.
8	28016	Кочевое	180	1916-1918, 1929, 1931- дейст.
9	28029	Березники	177	1931- дейст.
10	28131	Кизел	280	1891- дейст.
11	28116	Кудымкар	186	1894-1912, 1916-1919, 1922- дейст.
12	28134	Губаха	274	1931-1935, 1947-1963, 1965- дейст.
13	28128	Чермоз	122	1889-1905, 1925- дейст.
14	28138	Бисер	463	1888-1920, 1923-дейст.
15	28222	Добрянка	155	1891- дейст.
16	28234	Лысьва	223	1936-дейст.
17	28216	Верещагино	238	1924-дейст.
18	28224	Пермь	171	1832-дейст.
19	28238	Кын	244	1891-дейст.

№ п/п	Индекс ВМО	Метеостанция	Высота метеостанции, м абс.	Период наблюдений
20	28321	Оханск	163	1888-1903, 1904-1914, 1925- дейст.
21	28326	Кунгур	153	1852-1857, 1888-1892, 1896-1899, 1925- дейст.
22	28324	Оса	96	1891, 1922-дейст.
23	28334	Шамары	247	1931- дейст.
24	28430	Ревда	325	1925- дейст.

Анализ исходных данных показал, что гидрологические ряды наблюдений на реках имеют разную продолжительность, при этом наблюдается несовпадение их начал. Также в начале 60-х годов XX в. изменилась методика наблюдения за снегозапасами, а в 1966 г. ввели поправку на смачивание. Поэтому выбор разных по водности лет для диссертационного исследования был выполнен за период 1968 по 2022 гг.

2.4. Подход к исследованию внутригодового распределения стока рек в разные по водности годы

В 1933 г. В.Г. Глушковым был предложен географо-гидрологический метод «... устанавливает причинную связь всех вод данного района...». Основой метода является комплексный подход к исследованию вод суши, изучение физической природы гидрологических процессов, их проявления в конкретных географических условиях и выявление на этой основе причинно-следственных связей, существующих в рассматриваемом регионе. Как отмечает А.М. Владимиров (1990), наиболее полезен этот метод при изучении сложных природных многокомпонентных систем, а применительно к гидрологическим расчетам – при изучении условий формирования речных вод в многоводные и маловодные фазы стока и разработке методов его расчета при недостаточности или отсутствии данных гидрологических наблюдений.

На основе вышеизложенного подхода в 2016 г. для территории рек водосбора Верхней и Средней Камы В.Г. Калинин был предложен подход для анализа ВГРС, ориентированный на характерные по водности годы. В 2018 г. данный подход был апробирован К.И. Суманевой, однако только на многоводной группе лет, включавшей 1965, 1978, 1979 и 1984 гг.

В рамках настоящего исследования предложенный подход был расширен и уточнен. В ходе экспериментальных работ проведена его апробация на группах лет различной водности (многоводных, средних и маловодных). Кроме того, метод был дополнен алгоритмом расчета объема половодья и водности года в целом. В итоге усовершенствованный подход включает следующие основные положения:

1. Выбор характерных по водности лет. Исходными данными послужили значения ежедневных, среднемесячных и среднегодовых расходов воды по 49 гидрологическим постам (г/п). По каждому посту ряды со значениями среднегодовых расходов воды ранжировались в порядке убывания и определена обеспеченность расходов по формуле:

$$P = \frac{m}{n + 1} * 100\% \quad (2.1)$$

это дало основание поделить ранжированный ряд на 3 равные части: многоводные ($P < 33,3\%$), средние по водности ($33,3\% \leq P \leq 66,7\%$) и маловодные годы ($P > 66,7\%$) (СП 529.1325800.2023).

В каждой характерной по водности группе лет были выбраны годы таким образом, чтобы данные имелись для большинства гидрологических постов.

2. Типизация рек. На основании ежедневных расходов воды построены гидрографы для каждого гидрологического поста за каждый выбранный по водности год.

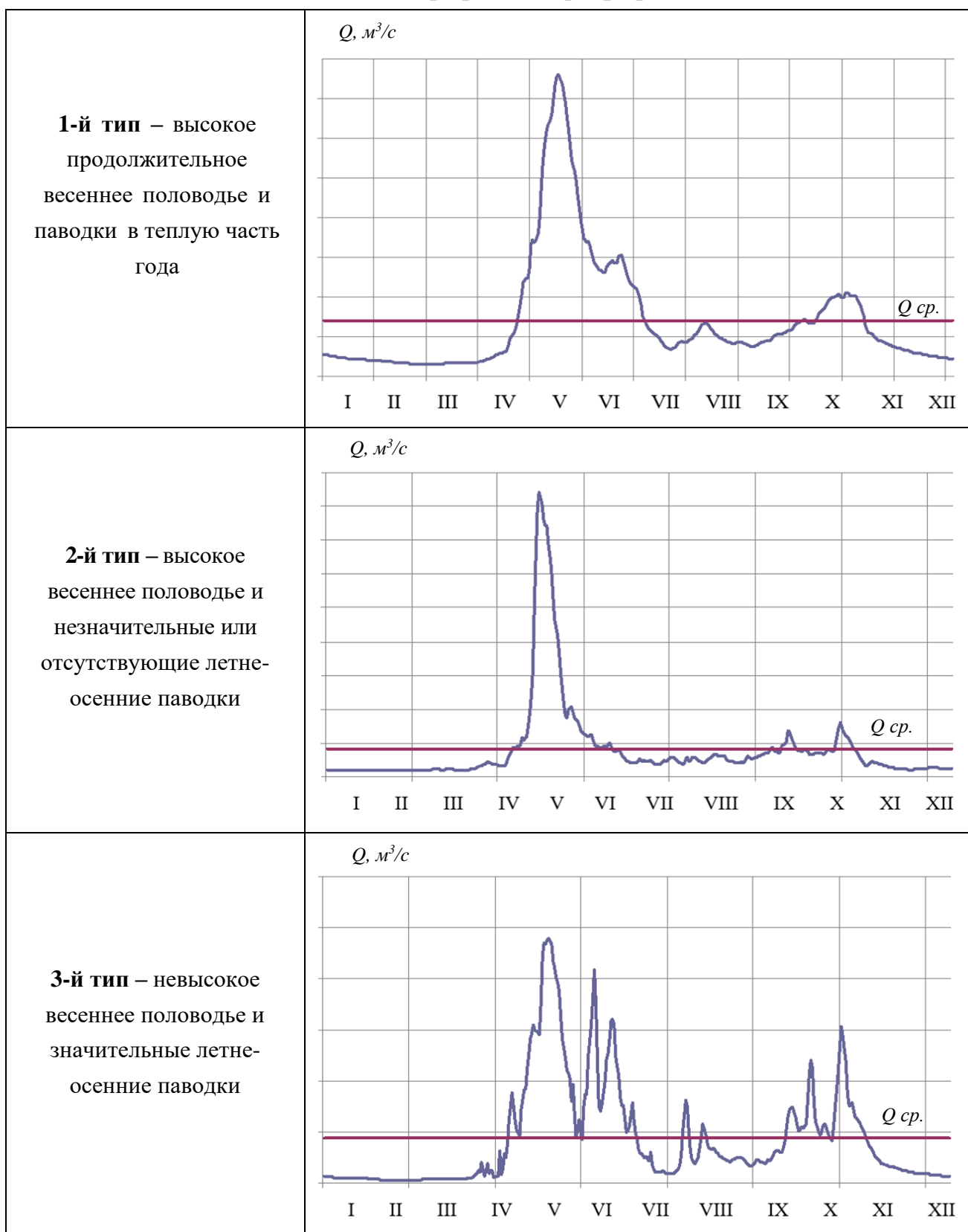
Критерием отнесения к тому или иному типу являлось:

а) оценка ВГРС по внешнему виду гидрографа (выявление фаз водного режима);

б) количественный критерий – расчет обеспеченности максимальных расходов воды и доли весеннего (IV-VI) стока в годовом, а также величины уменьшения среднегодового расхода воды при «срезке» дождевых паводков (если уменьшение составляло 15% и более, то считалось, что дождевые паводки оказывают существенное влияние на величину среднегодового расхода воды и гидрограф относится к другому типу).

Анализ основан на типизации гидрографов (табл. 2.3) по следующему принципу (Калинин, Суманеева, 2016):

Типовые графики гидрографов



Для наглядной визуализации в таблице 2.3 показаны типовые (модельные) формы гидрографов рек без численной оси расходов воды $Q, \text{ м}^3/\text{с}$.

3. Анализ внутригодового распределения стока и районирование исследуемой территории. Для выявления особенностей ВГРС рек за выделенные характерные по водности годы по каждому гидрологическому посту рассчитывались значения доли месячного стока в % от годового с последующим их графическим отображением. Полученные графики объединялись в группы по подобию ВГРС исследуемых рек (начало, максимум и окончание весеннего половодья, летне-осенних дождевых паводков, а также значениям долей месячного стока). По результатам выделенных групп рек выполнялось районирование территории водосбора Верхней и Средней Камы и сравнивалось с районированиями, полученными ранее по А.С. Шкляеву (Краткий справочник, 1966) и в «Ресурсы поверхностных вод. Том 9» (1973).

Для проведения границ нового уточненного гидрологического районирования использованы границы водораздельных линий рек водосбора Верхней и Средней Камы (Калинин, Пьянков, 2010) с учетом центров тяжести водосборов и Digital Elevation Model (DEM) территории.

На основе нового уточненного гидрологического районирования оценивалось многолетнее изменение внутригодового распределения стока рек на исследуемой территории. Восстановление пропусков в гидрологических рядах и проверка гидрологического районирования были выполнены с применением метода аналогии, реализованного посредством построения уравнений линейной регрессии между исследуемым рядом и реками-аналогами

Создание иллюстраций и оценка местных факторов выделенных однородных таксономических единиц выполнена с применением геоинформационных систем QGIS и ArcGIS. Степень залесенности, заболоченность и др. выполнена с использованием тематических карт России, представленных Институтом космических исследований Российской академии наук, предоставляющих информацию о пространственном распределении типов растительного покрова, породной структуры и запасов стволовой древесины в лесах, сельскохозяйственных земель (Барталев и др., 2016).

4. Оценка влияния естественной зарегулированности стока на ВГРС. За все исследуемые годы и для каждого гидрологического поста рассчитывался коэффициент естественной зарегулированности стока и максимальные значения доли стока (% от годового стока) за весенний период (IV-VI). Дополнительно выявлялись зависимости между площадью водосбора и естественной зарегулированностью стока.

5. Исследование воздействия основных факторов на формирование стока весеннего половодья.

Выполнено детальное исследование особенностей формирования и прохождения главной фазы водного режима в разные по водности годы. Проанализировано влияние морфометрических характеристик на продолжительность весеннего половодья.

За разные по водности годы построены зависимости слоя стока от основных факторов. В качестве основных факторов использованы следующие характеристики:

1. Максимальный запас воды в снеге S_{max} перед началом снеготаяния, мм слоя воды (определялся по данным снегомерных съемок);

2. Сумма среднесуточных положительных температур $\sum t_+$ от даты перехода температуры воздуха через 0°C к положительным значениям до даты начала интенсивного подъема уровня воды, $^\circ\text{C}$;

3. Сумма осадков за период весеннего половодья $\sum x_{весна}$, мм (определялась с учетом добегания их до замыкающего створа);

4. Осеннее увлажнение $U_{сент}$, мм (принималась величина суммы осадков за период от начала сентября до устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C к отрицательным значениям).

Для расчета характеристик стока и факторов его формирования применялись методы статистической обработки, при этом оценка влияния основных факторов была выполнена с помощью методов корреляционного и регрессионного анализа.

Поскольку влияние каждого фактора в отдельности на величину стока весеннего половодья прямо пропорционально, то для оценки их совокупного воздействия предложен параметр K , который представляет собой произведение этих показателей. Размерность коэффициента – $^\circ\text{C} \text{ мм}^3$, то есть сумма положительных температур воздуха от даты перехода через 0°C до даты начала интенсивного подъема уровня воды, умноженная на суммарный объем воды, образовавшийся от таяния снежного покрова, осадков, выпавших за период весеннего половодья и достаточного осеннего увлажнения почвы, уменьшающего инфильтрацию талой воды и обуславливающего преобладание поверхностного стока весной.

6. Разработка алгоритма расчета определения объема половодья и общей водности года. На основе исследования ВГРС в разные по водности годы совместно с главной фазой водного режима и факторов ее формирования, предложен алгоритм определения объема половодья и общей водности года.

Поскольку за период главной фазы водного режима на реках исследуемой территории формируется от 60% до 80% годового стока, определение объема половодья становится ключевым условием для оценки общей водности года.

На водосборе рек Верхней и Средней Камы расположены два водохранилища: Камское (первое в каскаде) и Воткинское (второе в каскаде). Основной приток воды в Воткинское водохранилище на 96% зависит от сбросов с Камского гидроузла. Поэтому оценку водности года можно оценить через расчет притока (объема) воды за период весеннего половодья в Камское водохранилище. В основе предложенного алгоритма расчета лежит разработка регрессионных моделей объема стока весеннего половодья по 8 замыкающим створам рек от факторов за период 1968-2010 гг. с верификацией полученных результатов на независимом материале за период 2011-2022 гг.

Для анализа однородности (стационарности) многолетних рядов сезонного стока применялись критерии Смирнова-Граббса и Диксона (для резко отклоняющихся экстремальных значений в эмпирическом распределении), критерий Фишера (для оценки однородности выборочных дисперсий и критерий Стьюдента (для выборочных средних), согласно СП 529.1325800.2023.

Оценка алгоритма расчета водности выполнена в соответствии с Наставлением по службе прогнозов (1962).

- Критерием качества расчета является отношение S/σ , где S – средняя квадратическая погрешность проверочных расчетов; σ – среднее квадратическое отклонение прогнозируемого значения элемента от среднего:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y_i')^2}{n - m}} \quad (2.1)$$

где y_i и y_i' – соответственно фактическое и предсказанное значения, n – число членов ряда; m – число степеней свободы, равное числу постоянных в прогностическом уравнении:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (2.2)$$

где y_i – данное значение явления в многолетнем ряду наблюдений, \bar{y} – норма

данной величины; n – число членов ряда;

Методика расчета считается применимой при следующих отношениях $\bar{S}/\bar{\sigma}$: при значении $\bar{S}/\bar{\sigma} \leq 0,50$ алгоритм расчета считается «хорошим»; при $0,50 \leq \bar{S}/\bar{\sigma} \leq 0,80$ «удовлетворительным»; если $\bar{S}/\bar{\sigma} > 0,80$ алгоритм расчета не имеет качества прогностического и не может использоваться для оценки водности.

- Величина обеспеченности допустимой погрешности (P , %) должна не менее предельных значений. Расчет P выполняется по формуле:

$$P = \frac{100}{m} \cdot n \quad (2.3)$$

где m – общее количество выпущенных расчетов; n – количество оправдавшихся расчетов.

Оправдываемость расчета рассчитывается с использованием допустимой погрешности. Для величины суммарного объема стока за весеннее половодье допустимая погрешность рассчитывается по формуле:

$$\pm\delta_{\text{доп}} = 0,674 \cdot \bar{\sigma} \quad (2.4)$$

где $\bar{\sigma}$ – среднее квадратическое отклонение предсказываемого объема стока от нормы.

Зависимости, установленные без учета резко отклонившихся точек, считаются практически применимыми при следующих значениях обеспеченности допустимой погрешности (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Предельные значения обеспеченности допустимой погрешности (P , %)

при $n \geq 25$	$P \geq 75\%$
при $25 > n > 15$	$P \geq 80\%$
при $n < 15$	$P \geq 85\%$

Примечание: n – число членов ряда, использованного при установлении прогностической зависимости или число проверочных прогнозов.

Также согласно Наставлению по службе прогнозов (1962) необходимо сравнить оправдываемость полученных расчетов, составленных с использованием методики расчета и при использовании нормы расчета. Оправдываемость по методике расчета должна быть выше, чем оправдываемость по норме.

Для оценки точности полученных расчетов использован коэффициент эффективности модели Нэша–Сатклиффа (NSE) (Moriasi et al., 2015). Он определяется как:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2} \quad (2.5)$$

Таблица 2.5

Критерии оценки качества гидрологических моделей (Moriassi et al., 2015)

Критерий	Качество			
	Очень хорошее	Хорошее	Удовлетворительное	Не удовлетворительное
R^2	$R > 0,92$	$0,87 < R \leq 0,92$	$0,77 < R \leq 0,87$	$R \leq 0,77$
NSE	$NSE > 0,80$	$0,70 < NSE \leq 0,80$	$0,50 < NSE \leq 0,70$	$NSE \leq 0,50$

Примечание: R^2 – коэффициент детерминации; NSE – критерий Нэша-Сатклиффа.

NSE близкий к 1 указывает на идеальное соответствие между рассчитанными и наблюдаемыми величинами, а NSE равное 0 указывает, что модель показывает те же результаты, что и среднее значение временного ряда. Критерий $NSE < 0$ указывает на то, что модель является худшим предсказателем, чем среднее значение наблюдений (табл. 2.5).

Выводы:

Исследуемая территория охватывает бассейн Верхней и Средней Камы и расположена на северо-востоке Европейской части России. Правобережная часть водосбора находится на Русской равнине, левобережная – в предгорьях и на западном склоне Уральских гор. Среди характерных черт водосбора можно выделить следующие: наличие хорошо выраженной широтной зональности на равнине и высотной поясности в горах Урала; распространение легко-растворимых пород (гипсы, ангидриды, известняки) на водосборах рек Колвы, Вишеры, Пильвы, Яйвы, Косьвы, Усьвы, Чусовой, Сылвы и Ирени, которое оказывает влияние на равномерность распределения стока внутри года и увеличение его естественной зарегулированности. Преобладание западного переноса воздушных масс обуславливает характерное для исследуемой территории распределение осадков

По водному режиму реки водосбора относятся к восточно-европейскому типу с четко выраженным весенним половодьем, дождевыми паводками в летне-осенний период и длительной устойчивой зимней меженью. Преимущественное питание – снеговое. Большая часть годового объема стока приходится на теплую часть года. По схеме В.Г.Андреенова бассейн р. Камы относится ко второй зоне

со следующими границами сезонов: весна IV–VI, лето-осень VII–XI, зима XII–III. Однако, как показывают исследования ученых Пермского университета, особенности географического положения рассматриваемой территории и наличие вертикальной поясности в распределении основных климатических факторов в горной части водосбора вносят изменения в указанные границы сезонов, поэтому они приняты следующими: весна IV–VI, лето-осень VII–X, зима XI–III .

В качестве исходных данных были использованы:

1. Ежедневные, среднемесячные и среднегодовые расходы воды по 49 гидрологическим постам (г/п). Сформированная база данных среднегодовых расходов воды охватывает многолетний период с момента создания гидрологических постов по 2022 г.

2. Данные наблюдений за среднесуточной температурой воздуха и атмосферными осадками на 24-х метеостанциях, расположенных на территории водосбора Верхней и Средней Камы. Величины максимальных снегозапасов использованы как по некоторым гидрологическим постам, где проводятся измерения, так и по метеостанциям.

В основу настоящего исследования положен подход В.Г. Калинина (2016) к анализу внутригодового распределения речного стока (ВГРС) для территории водосбора Верхней и Средней Камы. В рамках работы данный подход был расширен и уточнён: проведена его апробация на группах лет разной водности (многоводных, средних и маловодных), а также предложен алгоритмом расчёта объёма половодья и водности года в целом. В итоге, разработанный на базе подхода В.Г. Калинина (2016) усовершенствованный метод включает следующие ключевые положения:

1. Выбор характерных по водности лет;
2. Типизация рек;
3. Расчёт месячного стока и районирование территории по ВГРС;
4. Оценку влияния естественной зарегулированности стока на ВГРС;
5. Исследование воздействия основных факторов на формирование стока весеннего половодья.
6. Разработка алгоритма расчета определения объёма половодья и общей водности года.

ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ ВНУТРИГОДОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТОКА РЕК ВОДОСБОРА ВЕРХНЕЙ И СРЕДНЕЙ КАМЫ В РАЗНЫЕ ПО ВОДНОСТИ ГОДЫ

3.1. Типизация гидрографов рек и их пространственное распределение

Речной сток и его внутригодовое распределение (ВГРС) является одним из главных объектов научных исследований в области гидрологии и обеспечения устойчивого развития регионов страны. На основе расчетов ВГРС устанавливаются основные параметры водохозяйственного предприятия, условия сработки и наполнения водохранилищ, обеспечивается безаварийная работа гидротехнических сооружений и безопасность прилегающих к водным объектам территорий. Особого внимания при изучении ВГРС требуют годы максимальной и минимальной водности.

Диссертационное исследование особенностей ВГРС рек водосбора Верхней и Средней Камы в разные по водности годы, выполнено на основе подхода, предложенного В.Г. Калининым и др. (2016).

Исходными данными для типизации гидрографов рек исследуемой территории и анализа их пространственного распределения в разные по водности годы послужили значения ежедневных, среднемесячных и среднегодовых расходов воды по 49 гидрологическим постам (г/п). По каждому г/п ряды со значениями среднегодовых расходов воды ранжировались в порядке убывания и делились на 3 группы характерной водности согласно СП 529.1325800.2023 многоводные ($P < 33,3\%$), средние по водности ($33,3\% \leq P \leq 66,7\%$) и маловодные ($P > 66,7\%$) годы (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Годы разной водности

Группы водности	Годы	Обеспеченность
Многоводные	1971, 1978, 1979, 1984, 1990, 1993, 2002, 2008, 2017, 2019	для 15 г/п – $P \leq 5\%$, а для 34 г/п – $10\% \leq P < 33,3\%$
Средние	1968, 1972, 1973, 1981, 1983, 2000, 2003, 2004, 2006, 2009	для 49 г/п – $33,3\% \leq P \leq 66,7\%$
Маловодные	1970, 1973, 1975, 1976, 1977, 1982, 1988, 2010, 2011, 2012	для 32 г/п – $P \geq 95\%$, а для 17 г/п – $67,5\% \leq P \leq 95\%$

В каждой группе характерной водности были выбраны несколько лет с таким расчетом, чтобы с одной стороны данные имелись для большинства гидрологических постов, а с другой – эти годы представляли как стационарный период, так и период современных климатических изменений (табл. 3.1).

Исследование изменчивости ВГРС рек водосбора Верхней и Средней Камы в разные по водности годы (табл. 3.1) выполнено по комплексным графикам гидрографов, построенным на основе данных о ежедневных расходах воды для каждого гидрологического поста за каждый выбранный год, а также температуре воздуха и осадках по ближайшей метеостанции (рис. 3.1).

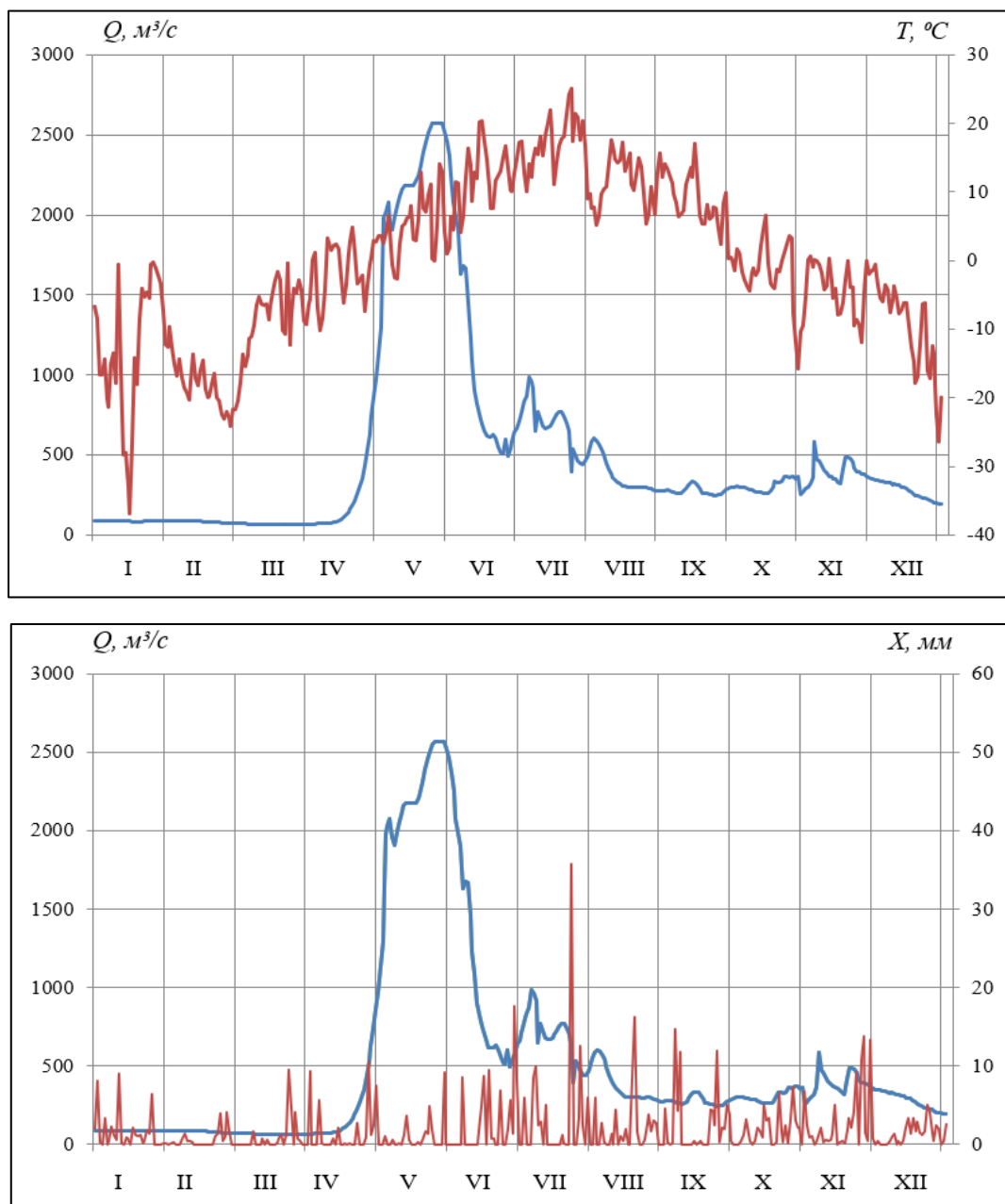


Рис. 3.1. Графики зависимостей г/п Кама – с. Бондюг (1971 г.) между ежедневным расходом воды и температурой воздуха, а также атмосферными осадками

Полученные результаты исследования показали, что если проанализировать все исследуемые многоводные годы, то выделяются три типа гидрографа (рис. 3.2), характерные для рек разных частей исследуемой территории (Калинин и др., 2018). Типизация гидрографов:

1-й тип – высокое продолжительное весеннее половодье и паводки в теплую часть года, характерен для рек северной и горной частей (Кама и ее левые притоки: Везляна, Пильва, Вишера, Колва, Яйва, Язьва, Косьва). Начало весеннего половодья наблюдается во второй половине апреля, окончание – в конце июня. Максимум приходится на конец мая – начало июня за счет обильного выпадения атмосферных осадков (доля стока дождевых паводков при срезке составляет больше 15%). Продолжительность весеннего половодья рек составляет примерно 40-70 дней. С июля по октябрь устанавливается летне-осенняя межень. С начала ноября по апрель на реках наблюдается устойчивая зимняя межень, питание рек происходит за счет подземных вод.

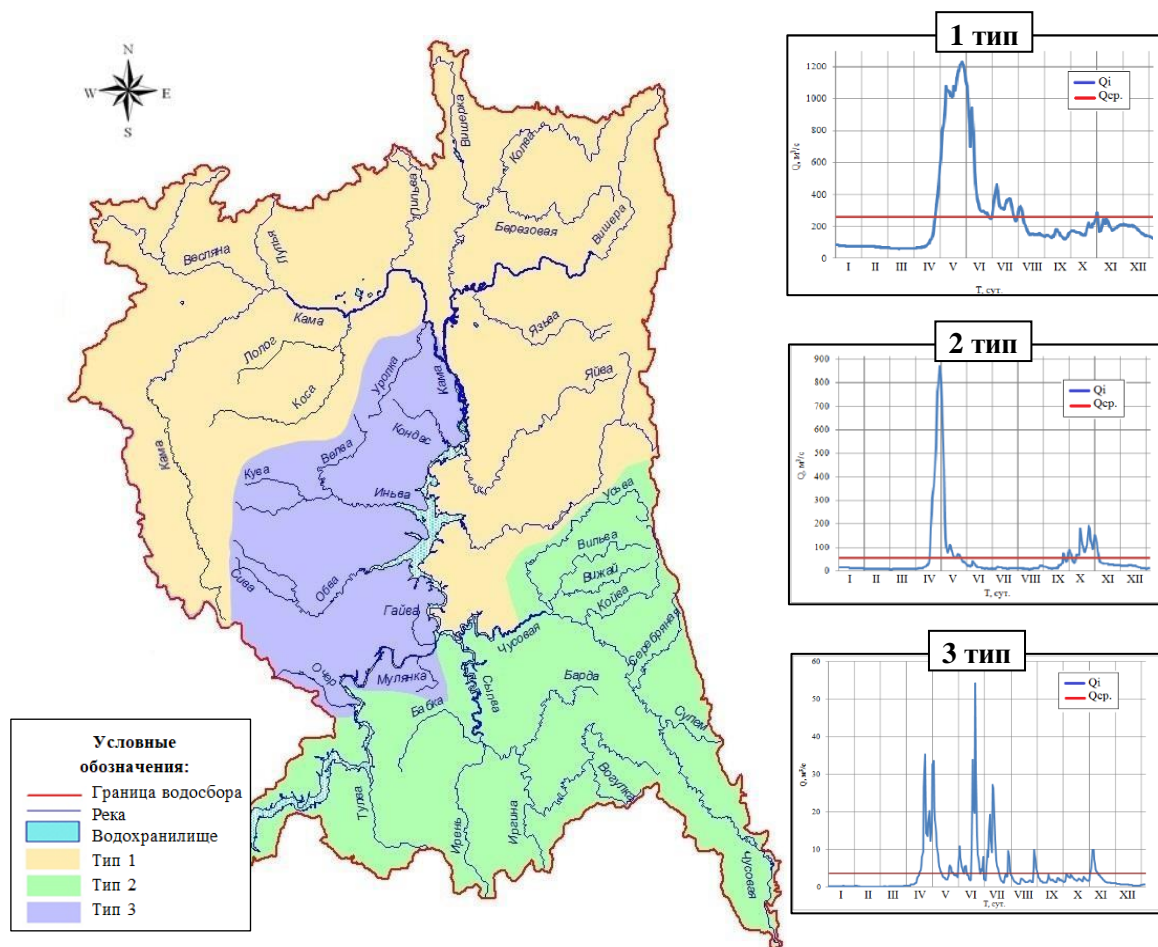


Рис. 3.2. Пространственное распределение типов гидрографов на реках водосбора Верхней и Средней Камы по условиям формирования максимального среднегодового расхода воды: 1-й тип (р. Кама – п. Гайны); 2-й тип (р. Чусовая – п. Кын); 3-й тип (р. Кува – д. Кува)

2-й тип – высокое весеннее половодье и незначительные или отсутствующие летне-осенние паводки, встречается на юго-западе (Тулва, Бабка, Ирень) и юго-востоке (Сылва, Вогулка, Чусовая Иргина) водосбора. Весеннее половодье рек данного типа начинается в первой половине апреля, достигая своего пика к началу мая, и резко уходя на спад. Окончание приходится на конец мая – начало июня. Продолжительность половодья рек этого типа составляет примерно 30-45 дней. С середины июня по ноябрь наблюдается летне-осенняя межень, иногда прерываясь незначительными летне-осенними паводками (доля менее 15% от среднегодового). С ноября по апрель на реках устанавливается устойчивая зимняя межень.

3-й тип – невысокое весеннее половодье и значительные летне-осенние паводки, встречающийся на реках в центральной части водосбора (правые притоки Камы: Кува, Велва, Кондас, Иньва, Обва). Начало весеннего половодья приходится на первую половину апреля, а окончание данного периода происходит в конце мая – начале июня. Максимумы половодья приходятся на конец апреля – начало мая, при этом на большинстве рек данного типа, наблюдаются двух-трех пиковые вершины половодья. Продолжительность весеннего половодья рек составляет примерно от 30 до 55 дней. С июня по ноябрь питание происходит за счет большого выпадения атмосферных осадков (июнь-июль). С ноября по апрель на реках наблюдается устойчивая зимняя межень.

Критерием отнесения к тому или иному типу являлось:

– оценка ВГРС по внешнему виду гидрографа (выявление фаз водного режима);

– количественный критерий – обеспеченность максимального расхода воды; доля весеннего (IV-VI) стока в годовом и величина уменьшения среднегодового расхода воды при «срезке» дождевых паводков (если уменьшение составляло 15% и более, то считалось, что дождевые паводки оказывают существенное влияние на величину среднегодового расхода воды и гидрограф относится к другому типу) (Владимиров, 1970; Калинин, Суманеева, 2016).

Анализ *средней по водности* группы лет показал, что в данные годы на реках всей исследуемой территории преобладает 2-й тип гидрографов (рис. 3.3 а).

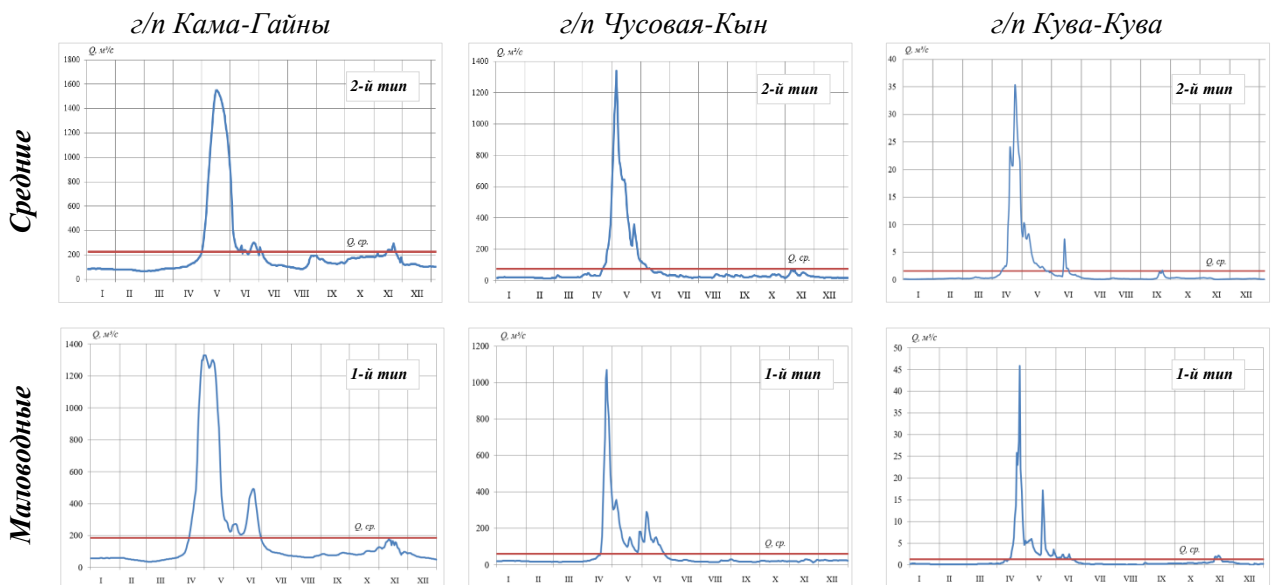
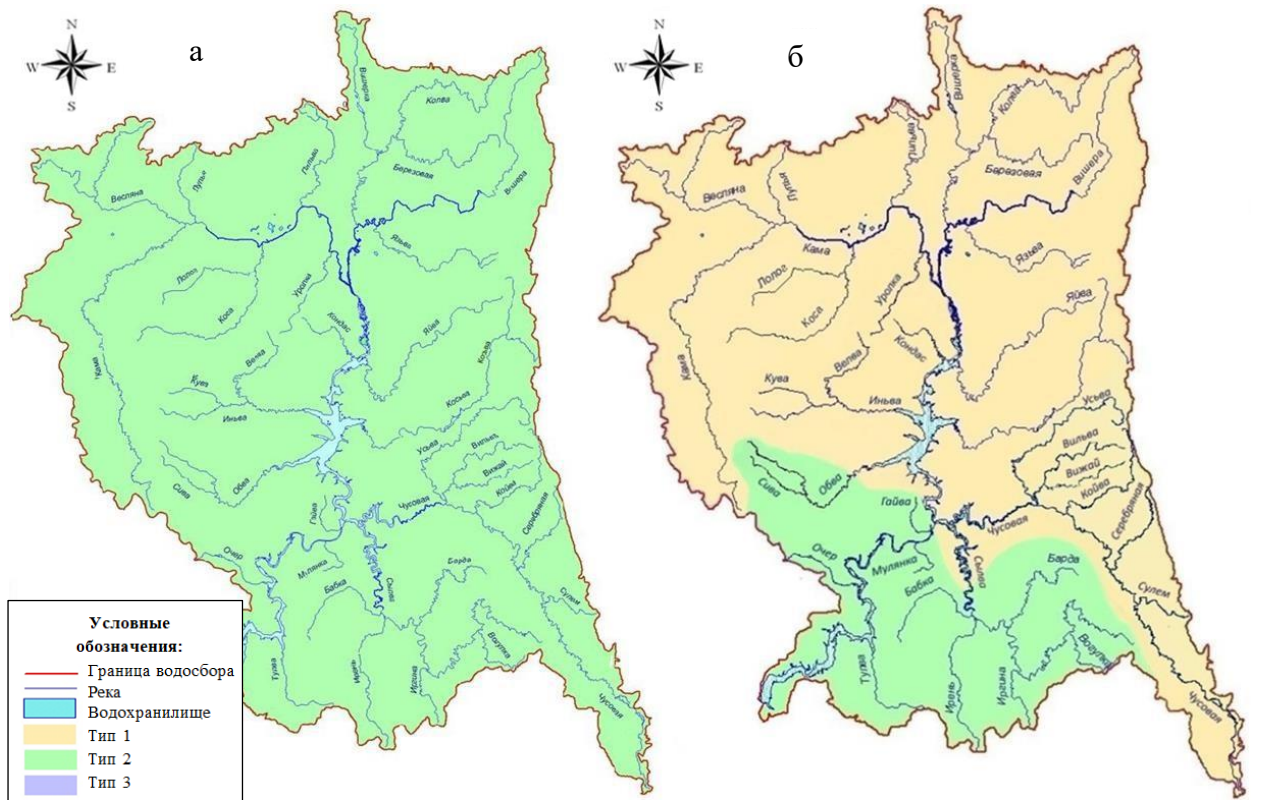


Рис. 3.3. Пространственное распределение разных типов гидрографов на реках водосбора Верхней и Средней Камы: а) в средние по водности годы, б) маловодные годы

В маловодные годы на реках наблюдается два типа гидрографа (рис. 3.3 б):

1-й тип – северная, горная и юго-восточная части (реки Иньва, Кама, Весляна, Лупья, Пильва, Вишера, Колва, Язьва, Яйва, Косьва, Усьва, Вильва, Койва, Серебряная, Сулем);

2-й тип – центральная (реки Обва, Гайва, Мулянка), юго-западная (Тулва) и юго-восточная части (реки Сылва, Вогулка, Иргина, Бабка, Ирень, Барда,

Чусовая) (рис. 3.3в) (Калинин и др., 2018).

Детальный анализ особенностей распределения выделенных типов гидрографов за разные по водности годы, позволил сделать вывод о том, что **3-й тип** (невысокое весеннее половодье и значительные летне-осенние паводки) преобладает преимущественно только в многоводные годы на реках центральной равнинной части водосбора Верхней и Средней Камы, с площадью водосбора менее 5500 км², где осадки могут охватывать значительную часть площади водосбора, меньше время добегания и отсутствуют эффекты сглаживания и аккумуляции стока.

3.2. Районирование территории водосбора Верхней и Средней Камы по внутригодовому распределению речного стока

Районирование как универсальный метод изучения территориальных особенностей широко используется в гидрологии и имеет большое значение при классификации водных объектов. При районировании территорий основное внимание уделяется системе таксономических единиц, которые должны служить основой для анализа регионов (Физико-географическое районирование, 1981). Среди них чаще всего применяются принципы объективности, территориальной целостности, комплексности, однородности, генетического единства, сочетания зональных и азональных факторов (Исаченко, 1991; Николаев, 1979). В гидрологии для этой цели используются: фазы водного режима, источники питания рек, форма гидрографа, ВГРС, среднегодовой расход воды, соотношение элементов водного баланса и т.д. (Калинин, Механошина, 2024).

На втором этапе был выполнен анализ пространственных закономерностей формирования речного стока и его внутригодового распределения на исследуемых реках, а также составлена схема районирования территории водосбора.

Для исследуемой территории в изданиях «Ресурсов поверхностных вод» (1973), представляющих научное обобщение данных о режиме водных объектов, проведена детализация схем районирования, выполненная на основе следующих критериев:

– коэффициент стока η – отношение величины стока к количеству выпавших на площадь водосбора осадков, обусловивших возникновение этого стока.

– коэффициент естественной зарегулированности φ – показатель неравномерности внутригодового распределения стока, который отражает величину базисного стока в годовом объеме стока, выраженного в долях от единицы. Численно коэффициент φ равен отношению площади гидрографа, расположенной ниже ординаты среднегодового расхода (базисный сток), к общей площади этого гидрографа (годовой сток). Базисная часть стока отражает естественную зарегулированность водосбора и его аккумулирующую способность (Соколовский, 1946).

В соответствии с особенностями водного режима рек по значениям коэффициентов η и φ на территории водосбора (рис. 3.4 а) выделено 5 районов (Ресурсы...,1973):

I- й район – бассейны левых притоков р. Камы, стекающих со склонов Северного Урала: Вишеры, Колвы, Низьвы, Яйвы и др. Режим этих рек характеризуется относительно выровненным распределением стока внутри года. Коэффициенты естественной зарегулированности стока составляют 0,55-0,6, а коэффициенты стока $\eta = 0,50-0,70$. Большие площади этого района, сложенные известняками и гипсоносными породами, отличаются интенсивным развитием карста.

II- й район – бассейны рек Косьвы и Чусовой, а также бассейны верхнего и среднего течения р. Сылвы. Распределение стока этих рек внутри года характеризуется меньшей равномерностью ($\varphi = 0,45-0,50$, $\eta = 0,30-0,35$) по сравнению с реками I-го района из-за менее благоприятных условий подземного питания и уменьшения водоносности известняковых толщ. Незначительная регулирующая способность карста на Среднем Урале, по-видимому, обусловлена относительно небольшой толщиной карстующихся пород и тесной связью карстовых вод с поверхностными, что не способствует выравниванию стока внутри года (Ресурсы...,1973).

III- й район – северные левые притоки р. Камы (реки Порыш, Весляна, Южная Кельтма, Пильва) и правый приток р. Колвы – р. Вишерка. Реки отличаются выровненным распределением стока внутри года ($\varphi = 0,55-0,65$, $\eta = 0,35-0,45$).

IV- й район – верхняя часть бассейна р. Камы до г. Перми (без северных левых притоков) – водосборы рек Косы, Иньвы, Обвы. Значения φ на реках района также довольно устойчивы (0,40-0,45), а коэффициент стока $\eta = 0,30- 0,35$.

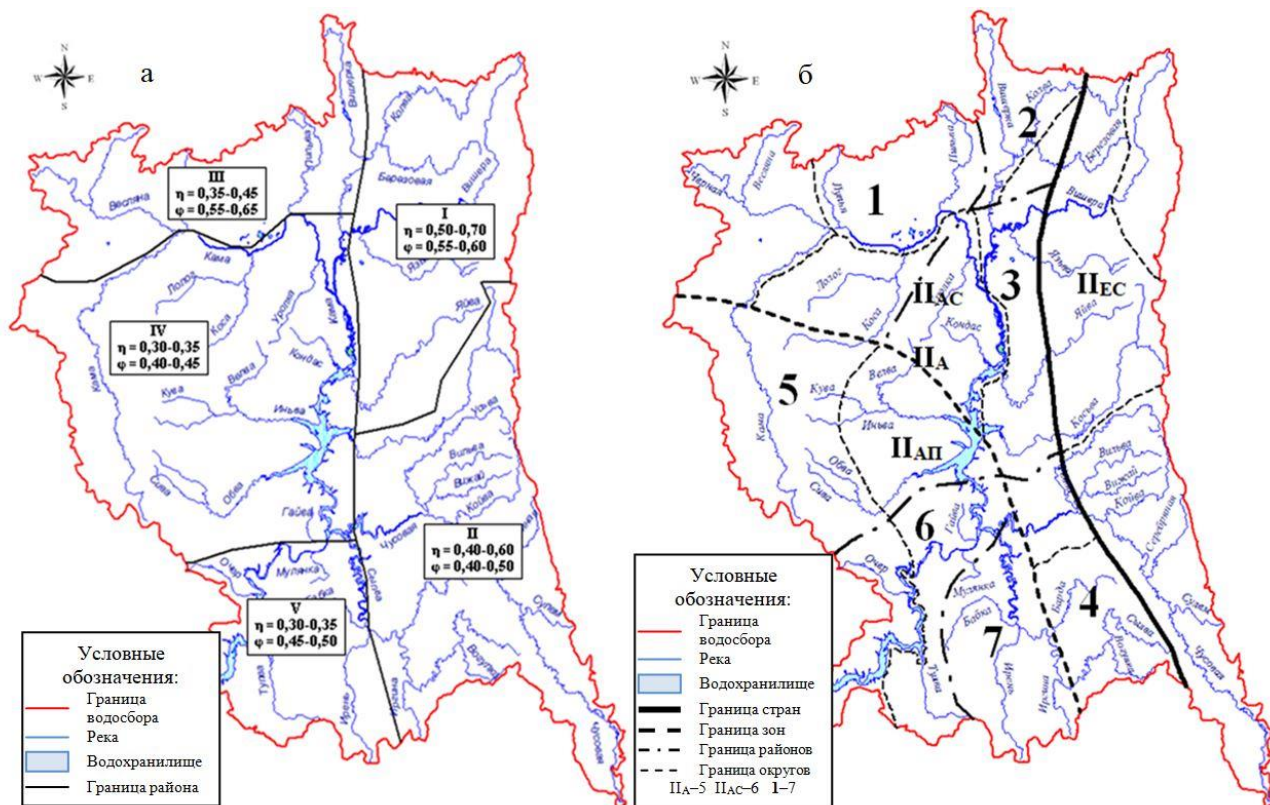


Рис. 3.4. Схема гидрологического районирования: а) по Ресурсам..., 1973; б) по схеме А.С. Шкляева (Краткий справочник, 1966 г.) (1 – границы стран, 2 – границы зон, 3 – границы округов, 4 – границы районов, 5 – страны, 6 – зоны, 7 – округа)

V-й район – бассейны рек, впадающих непосредственно в Воткинское водохранилище (реки Очер, Тулва, Сайгатка), а также бассейны левобережных притоков р. Сылвы (Ирени и Бабки). Значения φ на реках района составляют 0,45-0,50, а коэффициент стока $\eta = 0,30-0,35$ (Ресурсы..., 1973).

Еще одна схема районирования территории водосбора разработана А.С. Шкляевым (Краткий справочник..., 1966), в которой таксономические единицы выделены с учетом влияния местных условий на формирование речного стока (рис. 3.4 б):

- страны – по источнику влаги, режиму атмосферных осадков и интенсивности увлажнения по В.А. Троицкому (1938);
- зоны – по характеру водного баланса, соотношению испарения и стока;
- районы выделяются по особенностям местных условий, влияющих на сток (озерность, заболоченность, густота речной сети, закарстованность и т.д.);
- округа – таксономические единицы, являющиеся критерием однородности гидрологического режима рек (Краткий справочник..., 1965).

Рассматриваемая территория по схеме гидрологического районирования

относится к двум странам: Уральской горной (П_{ЕС}), занимающей восточные горные районы (одна провинция, один округ – Западно-Уральский и три района) и Западной Атлантической (П_А) охватывающей остальную территорию (две зоны (П_{АС}, П_{АП}), пятнадцать районов и семь округов: (Верхне-Камский, Колвинский, Камско-Вишерский, Нижне-Чусовской, Иньвинско-Обвинский, Средне-Камский, Нижне-Сылвинский) (рис. 3.4 б).

Из рис. 3.4 видно, что эти схемы значительно отличаются друг от друга, как по количеству выделенных таксономических единиц, так и по местоположению их границ. Поэтому возникает вопрос, могут ли рассмотренные схемы районирования быть использованы для характеристики ВГРС (Калинин, Механошина, 2024).

Пространственные закономерности внутригодового распределения стока рек водосбора в разные по водности годы. Для анализа ВГРС рек водосбора были построены гидрографы внутригодового распределения для каждого г/п за каждую группу водности. Среднемесячные расходы были переведены в доли стока (% от годового), что позволило нивелировать влияние абсолютной водности и сравнивать режим стока разных рек независимо от их размеров и площади водосбора.

Гидрографы были сгруппированы в соответствии с гидрологическим районированием, приведенным в Ресурсах... 1973 г., а также по округам районирования А.С. Шкляева (Краткий справочник..., 1966). В первом случае обнаружено несоответствие сроков начала, максимума, окончания весеннего половодья и летне-осенних дождевых паводков на разных реках (рис. 3.5 а, б). Причиной является сильная генерализация районов, связанная с применением карт мелкого масштаба (Калинин, Механошина, 2024).

При использовании схемы районирования А.С. Шкляева (Краткий справочник..., 1966) в округа попадает очень мало (1-5) центров тяжести водосборов рек, на которых организованы наблюдения за стоком (рис. 3.5 в, г), что затрудняет проведение анализа ВГРС.

Поэтому гидрографы были объединены в группы в соответствии со сроками начала, максимума, окончания весеннего половодья и летне-осенних дождевых паводков, а также значений доли их месячного стока в годовом – что явилось **критерием районирования** территории водосбора Верхней и Средней Камы по однородности внутригодового распределения стока (рис. 3.6).

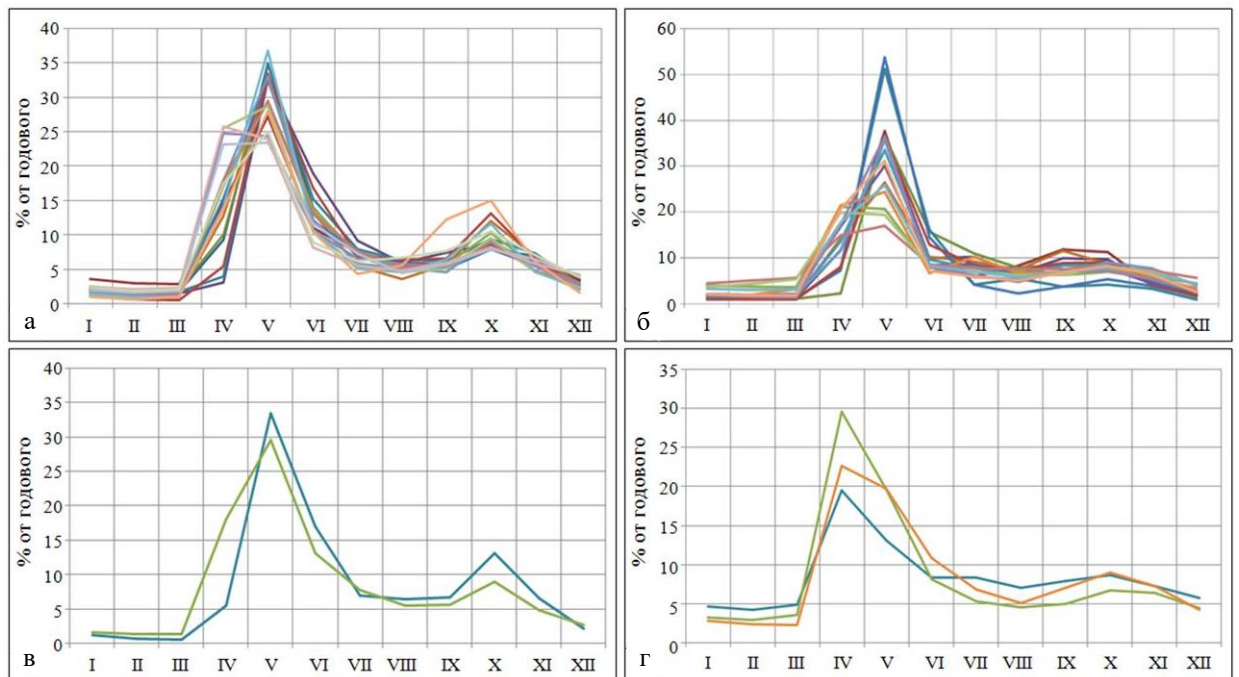


Рис. 3.5. Внутригодовое распределение стока рек в % от годового на примере многолетних, сгруппированных по разным схемам районирования: а) II район, б) IV район по схеме Ресурсы..., 1973; в) 2-й округ, г) 6-й округ по схеме А.С. Шкляева (Краткий справочник ..., 1966)

По сравнению с районированием, приведенным в Ресурсах...1973 г. (рис. 3.4 а), количество районов увеличилось, и изменились их границы. При этом границы районов в горной части (рис. 3.6) практически совпадают со схемой А.С. Шкляева (Краткий справочник..., 1966), но в то же время проведено укрупнение районов и уточнение их границ в равнинной части исследуемой территории (рис. 3.4 б). Границы однородных районов проведены по границам водораздельных линий рек водосбора Верхней и Средней Камы (Калинин, Пьянков, 2010) с учетом центров тяжести водосборов, Digital Elevation Model (DEM) территории с применением геоинформационных систем QGIS и ArcGIS .

Всего выделено шесть районов (рис. 3.6, табл. 3.2). Для рек *северного горного района (1)* (реки Вишера, Березовая, Язьва, Яйва, Косьва и верхнее течение р. Колвы) характерно интенсивное увеличение стока весеннего половодья в третьей декаде апреля. Суммарный объем стока за весенний период составляет 52-68% от годового. Средняя продолжительность весеннего половодья на реках изменяется от 53 до 65 сут. Сроки окончания весеннего половодья в среднем приходятся на третью декаду июня – первую декаду июля. Доля осенних (сентябрь-октябрь) дождевых паводков для рек северной горной территории составляет 9-19% годового стока, доля стока летней межени – 8-15%, зимней – 11-21% (Калинин, Механошина, 2024).

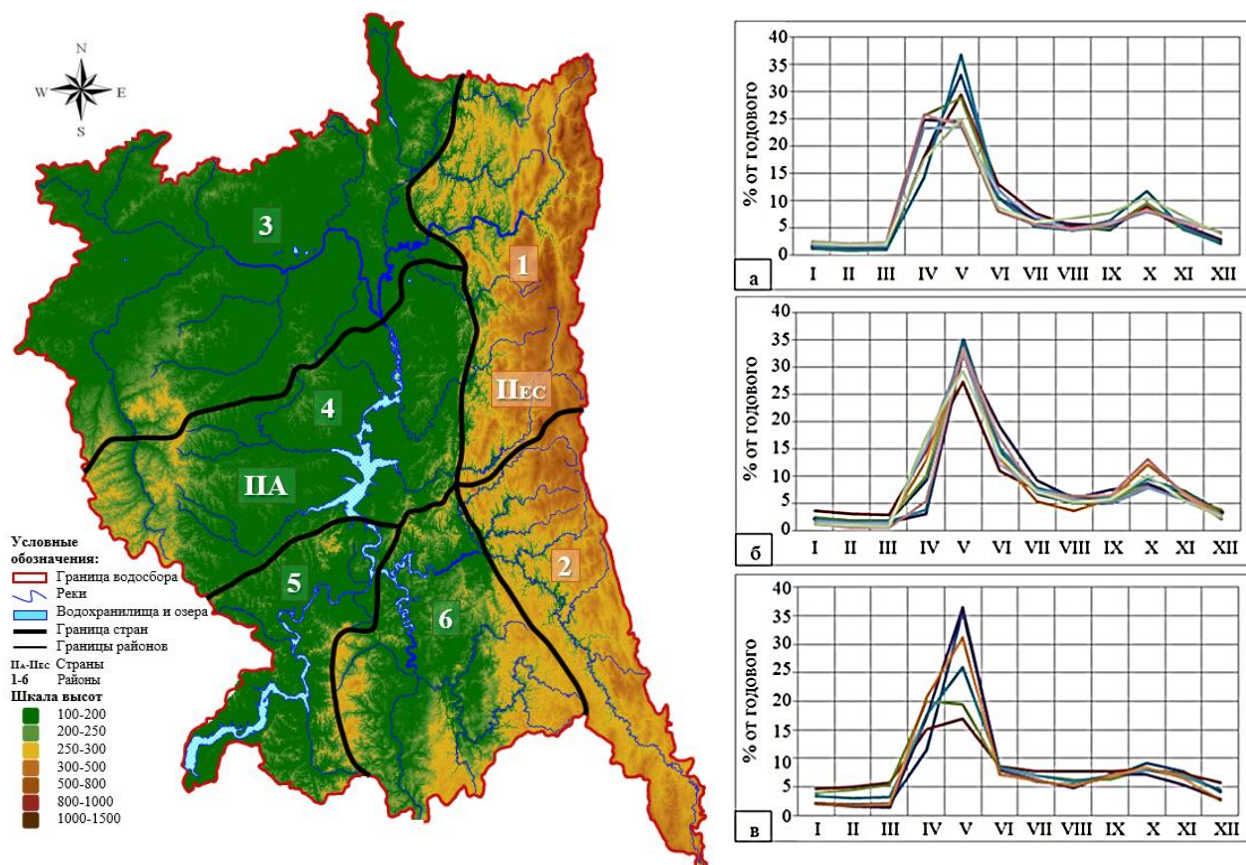


Рис. 3.6. Схема гидрологического районирования на основе ВГРС: а) ВГРС северного равнинного района; б) ВГРС центрального равнинного района; в) ВГРС юго-западного района

Южный горный район (2) включает верхнее и среднее течение р. Чусовой с притоками Усьва, Вильва, Вижай, Койва, Серебряная и характеризуется увеличением стока со второй декады апреля. Суммарный объём стока за весенний период составляет 50-79% от годового. Продолжительность весеннего половодья составляет 41-56 сут. Весеннее половодье заканчивается в среднем в первой декаде июня. На долю осенних паводков, наблюдаемых в сентябре-октябре, приходится 8-23%, доля стока летней межени – 6-19%, зимней – 7-22%.

Для рек **северного равнинного района (3)** (реки Черная, Весляна, Лупья, верхнее течение рек Кама, Лолог, Коса, Уролка, Пильва, Вишерка, среднее и нижнее течение р. Колвы) характерно интенсивное увеличение стока весеннего половодья во второй декаде апреля. Суммарный объём стока за весенний период составляет 52-77% от годового. Средняя продолжительность весеннего половодья на реках изменяется от 51 до 64 сут. Сроки окончания весеннего половодья в среднем приходятся на вторую декаду июня. Доля осенних (сентябрь-октябрь) дождевых паводков составляет 7-20%, доля стока летней межени – 5-16%, зимней – 9-22%.

Доля стока в % от годового для разных периодов водного режима

№	Район	Группы водности								
		Многоводные годы			Средние по водности года			Маловодные годы		
		IV-VI	VII-X	XI-III	IV-VI	VII-X	XI-III	IV-VI	VII-X	XI-III
1	Северный горный	52-60	28-32	11-16	54-68	18-28	12-18	54-65	22-30	13-21
2	Южный горный	50-75	15-37	7-22	63-79	11-26	8-14	52-71	14-26	10-22
3	Северный равнинный	53-61	25-33	11-19	53-77	14-28	9-21	52-75	15-26	9-22
4	Центральный равнинный	51-65	25-37	10-17	68-82	9-17	9-16	69-87	5-16	8-15
5	Южный восточный	41-62	25-31	13-28	40-68	18-32	14-29	40-71	19-29	10-30
6	Южный западный	41-58	22-32	19-27	48-59	20-28	17-24	53-66	16-22	17-24

Центральный равнинный район (4) включает верхнее течение р. Камы, бассейны рек Кондас, Иньвы, Обвы, для которых характерно увеличение стока с середины апреля. Эти реки отличаются повышенным стоком в апреле (до 26% годового стока), что связано с предполоводной сработкой прудов на рр. Иньве и Обве. Суммарный объём стока за весенний период составляет 51-82% от годового, а продолжительность весеннего половодья – 35-45 сут. Сроки окончания весеннего половодья в среднем приходятся на первую декаду июня. На долю осенних дождевых паводков приходится около 3-27%, однако в некоторые годы эти значения могут быть выше или составлять такую же долю, как и в период весеннего половодья, доля стока летней межени – 2-13%, зимней – 7-17% (Калинин, Механошина, 2024).

Юго-восточный район (5) включает бассейн р. Сылвы и нижнее течение р. Чусовой, для которого характерно непродолжительное весеннее половодье (вторая декада апреля – третья декада мая) с максимумом, наблюдаемым в мае, на долю которого приходится 40-71% годового стока. На долю дождевых паводков в осенний период приходится 9-16% годового стока, летней межени – 8-16%, зимней – 10-30%.

Юго-западный район (6) включает водосборы небольших по площади рек

Очер, Тулва, Гайва, Мулянка, которые протекают по сильно урбанизированной территории и испытывают значительное антропогенное влияние на формирование стока. На этих реках увеличение стока наблюдается в феврале-марте (до 10% годового стока). Суммарный объём стока за весенний период составляет 41-66% от годового, продолжительность весеннего половодья на реках – 38-48 сут. Окончание весеннего половодья отмечается в третьей декаде мая. На долю дождевых паводков в осенний период приходится 9-19% годового стока, на долю стока летней межени – 7-16%, зимней – 17-27% (Калинин, Механошина, 2024).

В пределах выделенных районов на реках наблюдается соответствие сроков наступления основных фаз водного режима, и, следовательно, однородность внутригодового распределения стока.

Анализ доли стока разных фаз водного режима в % от годового для лет разной водности (табл. 3.2) показал, что в средние по водности годы доля стока весеннего половодья по сравнению с многоводными значительно увеличивается на реках 2, 3, 4 районов (на 7-30%), достигая максимальных значений на малых реках Сива, Койва, Вильва, Сулем. В маловодные годы объем весеннего половодья изменяется незначительно (до 6% в ту или иную сторону по сравнению со средними по водности годами).

Доля стока в летне-осенний период при уменьшении водности года снижается. На реках 2, 3, 4 районов на 9-28%, на реках 1, 5, 6 районов – на 4- 10%. Доля стока зимнего периода в годы разной водности изменяется незначительно (1-5%).

Отдельно следует отметить р. Очер (5 район) и рр. Ирень, Иргина (6 район). Сток р. Очер зарегулирован каскадом прудов, что приводит к его перераспределению внутри года. Доля стока весеннего половодья снижается в разные по водности годы в среднем до 46%, а доли летне-осеннего и зимнего стока увеличивается до 27% и 24% соответственно.

Территории водосборов рек Ирень и Иргина сильно закарстованы с положительным подземным водообменом и значительной относительной водностью. Для этих рек характерно снижение доли стока весеннего половодья в среднем до 45% и увеличение долей летне-осеннего и зимнего стока до 29% и 26% соответственно (Калинин, Механошина, 2024).

Для планирования использования водных ресурсов, обеспечения надежной эксплуатации гидротехнических сооружений и систем водоснабжения крайне важным является знание ВГРС различной обеспеченности, которое базируется на установленных закономерностях распределения стока рек по сезонам и внутри

сезонов. При недостаточности или отсутствии наблюдений на исследуемом водотоке для приведения ряда к многолетнему периоду, удовлетворяющему понятию репрезентативности, применяется метод подбора реки-аналога. Одним из основных требований при выборе реки-аналога является однородность физико-географических условий формирования стока, которая учитывается в предложенной нами схеме гидрологического районирования (рис. 3.6).

Для оценки качества расчетов среднегодового объема воды по реке-аналогу, выбранной с учетом и без учета схемы гидрологического районирования, выполнен сравнительный анализ фактических и расчетных значений на независимом материале.

Таблица 3.3

Результаты расчета среднегодового объема воды на независимом материале

№	Местоположение водосбора	Гидрологический пост	Площадь водосбора	Среднегодовой объем воды, м ³ /год		Ошибка, %
				вычисленный	фактический	
1	Северный горный	Яйва – Усть-Игум	5320	2432	2669	9,8
3	Северный равнинный	Лолог-Сергиевский	1600	294,5	266,3	9,6
4	Центральный равнинный	Иньва-Кудымкар	2050	328,9	310,8	5,8
6	Южный западный	Мулянка-Субботино	336	43,7	50,2	6,4

С этой целью выбраны несколько гидрологических постов, данные по которым не использовались при построении схемы гидрологического районирования (табл. 3.3). Выполненные расчеты показали, что при использовании схемы районирования в выборе реки-аналога ошибка вычисленного среднегодового объема воды составила от 5,8 до 9,8% (табл. 3.3), а без учета схемы районирования – от 25 до 42% (Калинин, Механошина, 2024).

Оценка растительного покрова территории водосбора Верхней и Средней Камы выполнена с использованием тематических карт России, представленных Институтом космических исследований Российской академии наук, предоставляющих информацию о пространственном распределении типов растительного покрова, породной структуры и запасов стволовой древесины в лесах, сельскохозяйственных земель. В основе создания карт лежит метод картографирования, основанный на данных спектрорадиометра Terra-MODIS, где используются ежедневные измерения в красном и ближнем ИК каналах

(разрешение 250 м), а также дополнительные данные в голубом и среднем ИК диапазонах (500 м) и угловые характеристики. При этом главной особенностью является возможность анализа временных рядов для учета сезонной динамики растительности. Классификация выполняется алгоритмом LAGMA, разработанная легенда карты растительного покрова России включает в себя 23 тематических класса, образующих шесть различных групп земного покрова (Барталев и др., 2016).

Для выделенных однородных таксонов нового уточненного гидрологического районирования территории Верхней и Средней Камы (рис. 3.6) были выбраны и проанализированы несколько классов поверхности, а именно:

Леса – оценивалось растительное сообщество в общем виде, в состав которого входят темнохвойные вечнозеленые насаждения, светлохвойные вечнозеленые насаждения, лиственные насаждения, смешанные насаждения с преобладанием хвойных пород, смешанные насаждения, в которых площади крон хвойных и лиственных пород деревьев, смешанные насаждения с преобладанием лиственных пород, хвойные листопадные (лиственничные) редины хвойные листопадные (лиственничные).

Болота – территории, характеризующиеся избыточным увлажнением с преобладанием растительного покрова из мхов, лишайников, тростника, осоки и некоторых других видов. Часто встречаются участки с наличием редкого (< 20%) древесного полога.

Пахотные земли – регулярно обрабатываемые в течение последних пяти лет земли сельскохозяйственного назначения.

Луга – травяная растительность с продолжительностью вегетационного сезона более 5 месяцев, видовой состав которой характеризуется господством многолетних трав, главным образом злаков и осоковых, в условиях достаточного увлажнения. Площадь проекции крон деревьев и кустарников на земную поверхность составляет менее 20% (Барталев и др., 2016).

Анализ распределения растительного покрова по однородным таксонам гидрологического районирования (табл. 3.4) выявил четкую широтную дифференциацию. Максимальные значения залесенности (87-92%) характерны для горных районов, минимальные (55-69%) – для южных равнинных. Заболоченность значима лишь в Северном равнинном районе (6%), в остальных не превышает 1%.

Результаты расчета растительного покрова по однородным таксонам
гидрологического районирования

№	Название района	Залесенность, %	Заболоченность, %	Пахотные земли, %	Луга, %
1	Северный горный	87	0,3	0,01	7,5
2	Южный горный	92	0,4	0,20	5,0
3	Северный равнинный	84	6,0	0,04	6,0
4	Центральный равнинный	76	1,0	2,5	15
5	Южный восточный	55	0,2	7,5	26
6	Южный западный	69	0,3	7,1	20

Пахотные земли и луга концентрируются в южных районах (7,1-7,5% и 20-26% соответственно), тогда как в северных их доля минимальна (0,01-0,2% и 5-7,5%). Таким образом, наблюдается закономерное снижение лесистости и возрастание антропогенной трансформации земель с севера на юг.

3.3. Оценка многолетнего изменения внутригодового распределения стока рек

В условиях современных климатических изменений, особенно в годы экстремальной водности, исследование закономерностей формирования ВГРС является важным условием для устойчивого и рационального управления водными ресурсами, особенно крупных водохозяйственных систем, к которым относится территория Верхней и Средней Камы (водосбор Воткинского водохранилища). Вопросы многолетнего изменения сезонного стока являются одними из самых актуальных в настоящее время, которое может привести к дефициту водных ресурсов, либо к возникновению опасных гидрологических явлений, связанных с увеличением стока и формированием высоких половодий и паводков. Сезонное изменение речного стока обусловлено изменением климатических условий при практически неизменных физико-географических условиях водосборов (Механошина, Микова, 2025). Таким образом, дополнительно необходимо рассмотреть вопрос о влиянии происходящих климатических изменений на ВГРС рек исследуемой территории.

Исследованию многолетних колебаний стока рек водосбора посвящено немного работ, так В.Г. Калинин и др. (2020 г.) анализируется, как климатические

изменения влияют на распределение речного стока на некоторых реках водосбора для двух различных периодов наблюдений 1956–1995 и 1996–2017 гг. Другое исследование В.Г. Калинина и др. (2024 г.), посвящено исследованию многолетней изменчивости годового стока семи рек Верхней и Средней Камы, где выявлено, что с 1978 г. наблюдается увеличение годового стока рек.

Поэтому оценку многолетней динамики изменения внутригодового распределения стока целесообразно рассматривать по наиболее продолжительным по периоду наблюдений гидрологическим рядам. Для этого дополнительно была собрана база данных среднемесячных расходов воды по гидрологическим постам за период с момента начала наблюдений и по 2022 гг., которые расположены в разных однородных таксономических единицах уточненного гидрологического районирования территории (рис. 3.6).

Анализ исходных материалов выявил значительные различия в периодах наблюдений, так на 8 г/п из 49 г/п имеются многолетние ряды расходов с 30-х гг. XX в. до 2022 года. Наиболее продолжительные периоды наблюдений выявлены для таких гидрологических постов как р. Кама-Гайны (1931-2022 гг.), р. Вишера-Рябинино (1929-2022 гг.), р. Велва-Ошиб (1935-2022 гг.), р. Иньва-Кудымкар (1936-2022 гг.), р. Усьва-Усьва (1932-2022 гг.), р. Сылва-Подкаменное (1936-2022 гг.). Также в рядах наблюдений отдельных постов выявлены пропуски в гидрологических рядах. Для оценки многолетнего изменения ВГРС были выбраны 28 действующих г/п с наиболее продолжительными рядами наблюдений. Для восстановления пропусков наблюдений для г/п были выбраны реки-аналоги и с помощью уравнения линейной регрессии между расчетной рекой и рекой-аналогом было выполнено восстановление расходов согласно СП 529.1325800.2023.

Характерные черты географического расположения водосбора являются определяющими в распределении основных климатических характеристик территории, которые в свою очередь вносят изменения в границы сезонов речного стока. Согласно исследованиям ученых Пермского университета для водосбора Верхней и Средней Камы водохранилища они приняты следующими: весна IV–VI, лето-осень VII–X, зима XI–III (Ресурсы поверхностных вод, 1973; Калинин, 2014). Сток по сезонам рассчитывался как среднеарифметическое значение по выделенным месяцам.

Также для оценки многолетней динамики изменения ВГРС выполнен совместный анализ рядов среднемесячных значений температуры воздуха и месячных сумм осадков по ближайшим к г/п метеорологическим станциям (м/с)

расположенным в пределах исследуемой территории. Наиболее продолжительные периоды наблюдений имелись для таких м/с как Гайны (1936–2022 гг.), Чердынь (1899–2022 гг.), Кудымкар (1948–2022 гг.), Ножовка (1948–2022 гг.), Пермь (1883–2022 гг.), Бисер (1889–2022 гг.), Лысьва (1937–2022 гг.).

Для оценки значимости трендов изменения сезонного стока, осадков и температуры воздуха выполнена проверка нулевой гипотезы о его отсутствии. Если уровень значимости $p < 0,05$, то нулевая гипотеза отвергается, что означает, что существует статистически значимый тренд. В случае, если $p > 0,05$, нулевая гипотеза принимается, что указывает на отсутствие статистически значимого тренда (Калинин и др., 2024).

После восстановления данных по всем выбранным г/п и м/с с момента начала наблюдений по 2022 гг. выполнен анализ многолетней изменчивости метеорологических характеристик и ВГРС с помощью построения разностно-интегральных кривых (РИК). РИК отражает накапливающуюся разницу между текущими значениями исследуемой характеристики и их нормой. В большинстве случаев, для упрощения анализа временных колебаний характеристик различных по своей природе, эти отклонения приводятся к безразмерному виду посредством деления на коэффициент вариации.

Анализ трендов стока, температуры воздуха и осадков. Вся база климатических и гидрологических данных была протестирована на случайность и однородность, в соответствии нормальному закону распределения. Для значительной части г/п и м/с, особенно в зимний сезон, эта гипотеза была опровергнута, что свидетельствует о наличии значимых изменений, происшедших в сезонных рядах наблюдений (Механошина, Микова, 2025).

Вместе с тем все гидрологические и метеорологические ряды прошли оценку на значимость трендов (табл. 3.5, 3.6), а также были построены хронологические графики изменения рассматриваемых характеристик и сглаженные по 7-леткам кривые стока (рис. 3.7).

Анализ таблицы 3.6 и графиков многолетнего изменения стока рек на исследуемой территории показал, что по сезонам наблюдаются разнонаправленные тенденции (рис. 3.7). В весенний и летний сезоны на большинстве постов наблюдаются положительные тенденции в изменении стока рек.

Таблица 3.5

Оценка значимости трендов среднесезонной температуры воздуха и осадков

№ района	Метеостанция	Среднесезонная температура воздуха			Сумма осадков		
		Весна	Лето-осень	Зима	Весна	Лето-осень	Зима
1	Губаха	0,09	0,50	0,34	0,12	-0,08	0,35
2	Кын	0,33	0,46	0,38	0,20	-0,24	-0,02
3	Гайны	0,32	0,37	0,42	0,19	0,23	0,19
	Коса	0,30	0,40	-0,23	0,11	-0,16	0,32
	Чердынь	0,39	0,42	0,46	0,23	0,15	0,38
	Ныроб	0,36	0,43	0,44	0,31	0,19	0,52
4	Березники	0,09	0,51	0,36	-0,07	-0,08	0,31
	Верещагино	0,34	0,43	0,50	-0,01	-0,03	0,21
	Кудымкар	0,27	0,36	0,48	0,20	0,14	0,49
5	Добрянка	0,30	0,33	0,31	0,01	0,33	0,34
	Пермь	0,33	0,43	0,48	0,22	0,05	0,39
	Оханск	0,36	0,43	0,53	0,09	0,08	0,39
6	Лысьва	0,30	0,41	0,39	0,30	-0,01	0,42
	Кунгур	0,24	0,33	0,37	0,32	0,03	0,48
	Шамары	0,28	0,44	0,39	0,29	0,09	0,18

Примечание: **жирным курсивом** показаны статистически значимые величины (при $p < 0,050$).

Таблица 3.6

Оценка значимости трендов сезонного стока

№ района	Река-пост	Весна	Лето-осень	Зима
1	Вишера – Рябинино	0,31	0,18	0,51
	Язьва – Нижняя Язьва	-0,17	-0,20	0,55
	Колва – Петрецово	0,03	0,22	0,70
	Яйва – База	0,11	0,17	0,41
	Яйва – Усть-Игум	0,18	-0,02	0,18
	Косьва – Останино (Перемское)	0,03	0,08	0,41
2	Чусовая – Косой Брод	-0,17	-0,28	0,16
	Чусовая – Староуткинск	-0,14	-0,21	0,27
	Чусовая – Кын	0,09	0,01	0,12
	Чусовая – Лямино	0,13	-0,02	0,31
	Серебряная – Серебрянка	0,07	-0,06	0,41
	Усьва – Усьва	-0,04	-0,15	0,58

№ района	Река-пост	Весна	Лето-осень	Зима
3	Кама – Гайны	0,03	0,02	0,34
	Кама – Бондюг	-0,10	-0,03	0,44
	Коса – Коса	0,07	0,02	0,37
	Лолог – Сергеевский	0,26	0,10	0,37
4	Иньва – Кудымкар	0,19	0,17	0,54
	Иньва – Слудка	0,08	0,16	0,51
	Кува – Кува	0,05	0,03	0,43
	Велва – Ошиб	-0,09	0,08	0,40
	Кондас – Ощепково	-0,05	0,08	0,29
	Обва – Карагай	0,12	0,14	0,61
5	Гайва – Плотинка	0,06	0,01	0,18
	Мулянка – Субботино	0,06	0,26	0,47
	Очер – Казымово	-0,26	0,22	0,24
6	Сылва – Шамары	-0,29	0,02	0,01
	Сылва – Подкаменное	-0,12	0,07	0,14
	Вогулка – Шамары	0,33	0,02	0,09

Примечание: **жирным курсивом** показаны статистически значимые величины (при $p < 0,050$).

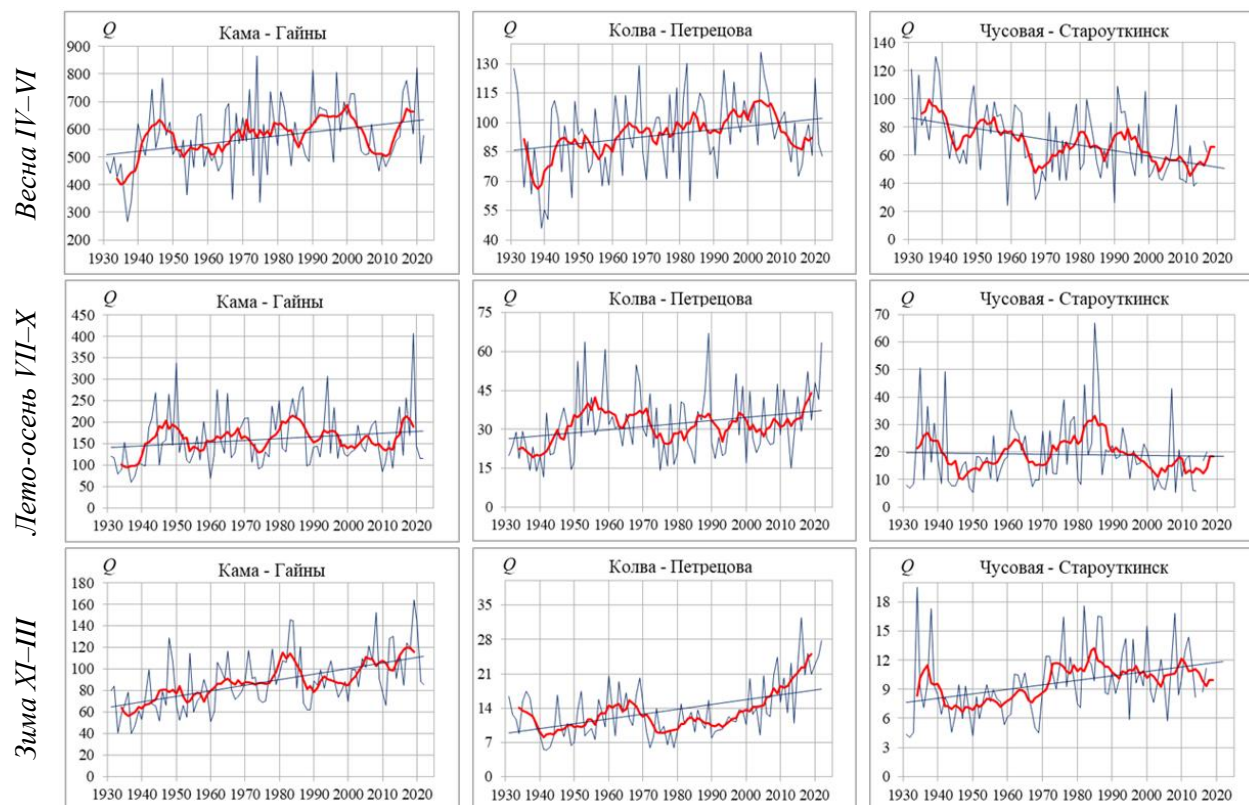


Рис. 3.7. Многолетнее изменение сезонного стока рек (синяя линия – ежегодные величины стока; красная линия – сглаженные по 7-леткам величины стока)

В весенний сезон только в пятом и шестом гидрологических районах наблюдаются статистически значимые отрицательные тенденции стока (табл. 3.6). В летний сезон отрицательные (незначимые за исключением одного поста) тенденции стока наблюдаются в основном в бассейне р. Чусовой (второй гидрологический район) (Механошина, Микова, 2025).

В зимний сезон на всех исследуемых постах отмечены положительные тенденции увеличения стока рек (табл. 3.6). При этом на большинстве гидрологических постов такие изменения оказались статистически значимыми. Исключение составили пятый и шестой гидрологические районы, где на большинстве постов положительные тенденции изменения зимнего стока оказались статистически не значимыми.

Построенные сглаженные по 7-леткам кривые стока показывают циклы увеличения и уменьшения стока, а также позволяют избавиться от флуктуаций водности конкретных лет, которые прослеживаются на хронологических графиках (рис. 3.7). Анализ кривых показал, что в рядах выделяются от 3-х и более полных циклов изменения водности, точки перегибов, которые совпадают с резкими всплесками повышенных и пониженных значений стока, при этом размываются границы циклов, и их становится труднее выявить.

Климат является одним из основных стокоформирующих факторов, влияющих на водность рек. Изменение климатических условий по сезонам приводит к внутригодовому перераспределению стока между сезонами. Для оценки изменений климатических условий сезонов выполнен расчет значимости трендов средних за сезон значений температуры воздуха и осадков (табл. 3.4). Результаты показали, что температура воздуха стала выше во всех районах во все сезоны. Данное изменение температуры воздуха оказалось статистически значимым. Реальные уровни значимости (*p-значения*) для большинства м/с находятся в пределах от 0,27 до 0,53, исключением являются м/с Гайны, Верецагино, Кын и Шамары (*p-значения* составляют от -0,02 до 0,21). Сумма осадков увеличилась только в зимние месяцы, на большинстве м/с выявленные тренды оказались статистически значимыми. В весенний сезон осадки преимущественно увеличиваются, но только в шестом районе данные изменения оказались статистически значимыми. В летне-осенний сезон проявляются разнонаправленные статистически не значимые тенденции (Механошина, Микова, 2025).

Очевидно, что повышение температуры воздуха и увеличение количества осадков в зимний сезон приводит к существенному увеличению зимнего стока на

исследуемой территории, реальные уровни значимости (*p-значения*) моделей для большинства г/п находятся в пределах от 0,27 до 0,70. Исключением являются единичные г/п, расположенные в *Южном горном (2)* и *Центральном равнинном (5)* районах, такие как г/п Чусовая-Лямино, Чусовая-Косой Брод и Очер-Казымово, а также все г/п, расположенные в *Южном восточном районе (6)*. Это можно объяснить тем, что сток на выявленных г/п во *2 и 5 районах* сильно зарегулирован прудами, а в *6 районе* водосборы рек сильно закарстованы. Наличие этих двух факторов влечет за собой сильное изменение водности и гидрологического режима, перераспределение стока внутри года и сглаживание влияния климатических последствий на распределение стока. Полученные результаты свидетельствуют о наличии значимых изменений, происшедших в рядах наблюдений в зимний сезон.

Определение года начала выраженных сезонных изменений. Для определения года – начала выраженных изменений сезонного стока рек водосбора Верхней и Средней Камы водохранилища были построены графики разностно-интегральных кривых, которые в последующем были сгруппированы по новым однородным таксонам гидрологического районирования и определены характерные точки перегибов кривой (табл. 3.7). Аналогичные расчеты выполнены для сезонных значений температуры воздуха и осадков.

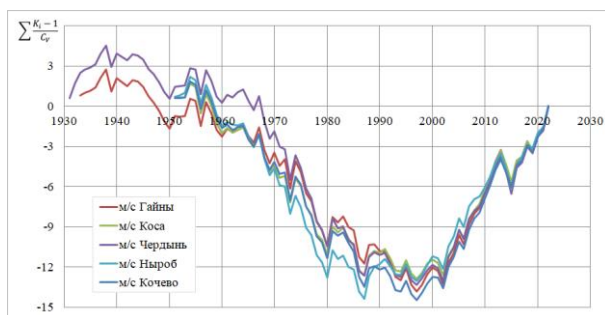
Таблица 3.7

Годы смены циклов водности в однородных районах

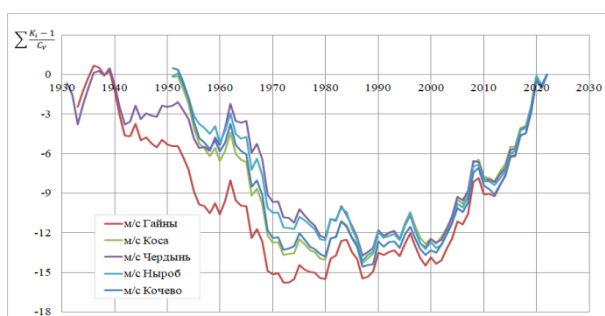
№	Название района	Средняя температура воздуха			Сумма осадков			Сезонный сток		
		Весна	Лето-осень	Зима	Весна	Лето-осень	Зима	Весна	Лето-осень	Зима
		V–VI	VII–X	XI–III	V–VI	VII–X	XI–III	V–VI	VII–X	XI–III
1	Северный горный	1986	1988	1988	1989–1996	1992–2002	1987–1996	1989	1977	1997
2	Южный горный	1986	1987	1988	1989–1996	1992–2002	1987–1996	1989	1977	1989
3	Северный равнинный	1986	1987	1987	1977–2007	1992–1993	1996–2006	1989	1977	1977
4	Центральный равнинный	1986	1997	1987	1997–2000	1992–1997	1987–1996	1988	1977	1977
5	Южный восточный	1986	1997	1987	1986–2000	1992–2003	1977–1989	1989	1977	1977
6	Южный западный	1986	1997	1987	1986–2004	1989–2002	1989–1996	1989	1982	1989

Центральный равнинный район

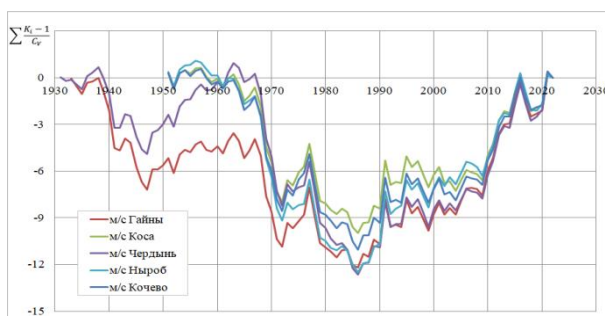
Весна IV–VI



Лето-осень VII–X

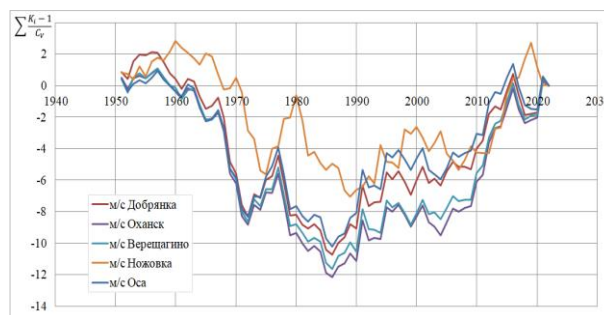


Зима XI–III

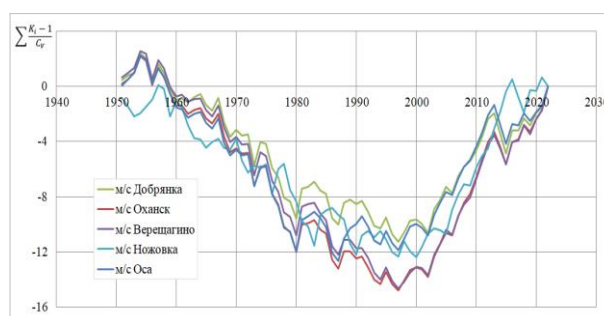


Юго-западный район

Весна IV–VI



Лето-осень VII–X



Зима XI–III

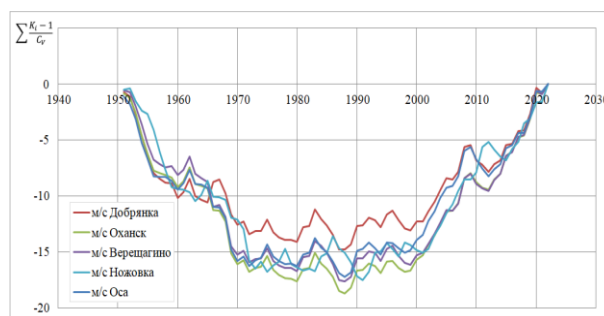


Рис. 3.8. Разностно-интегральные кривые средней температуры воздуха за разные сезоны для 4 и 5 районов

Анализ разностно-интегральных кривых температуры воздуха за весенний и зимний сезоны показал, что начиная с конца XIX в. – начала XX в. на территории водосбора наблюдается синхронное и продолжительное увеличение среднесезонной температуры (рис. 3.8). Момент начала выраженных изменений температуры воздуха приходится в среднем для всех м/с территории на период 1986–1988 г., при этом статистические характеристики выделенных ветвей подъёма и спада (среднее значение, коэффициенты вариации и асимметрии) значительно отличаются.

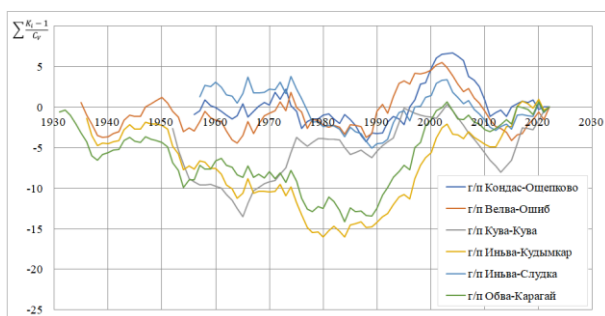
В летне-осенний сезон в южной (5, 6 районы) и центральной равнинной части (4 район) исследуемой территории наблюдается продолжительное снижение средней температуры воздуха вплоть до окончания 90-х гг. XX в. При

этом момент начала выраженных климатических изменений приходится на 1997 г., для остальной территории аналогично, как и для весеннего и зимнего сезонов – на 1987–1988 гг. (табл. 3.7).

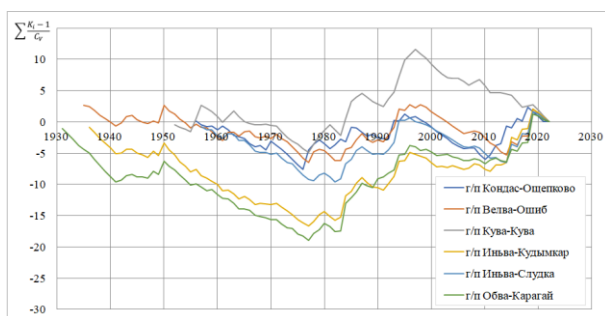
Затяжной характер маловодной фазы наблюдается и в горных таксонах (*1 и 2 районы*) в зимний сезон, и точка минимума приходится на 1989 и 1997 гг. соответственно, что обусловлено влиянием вертикальной зональности на водность рек.

Центральный равнинный район

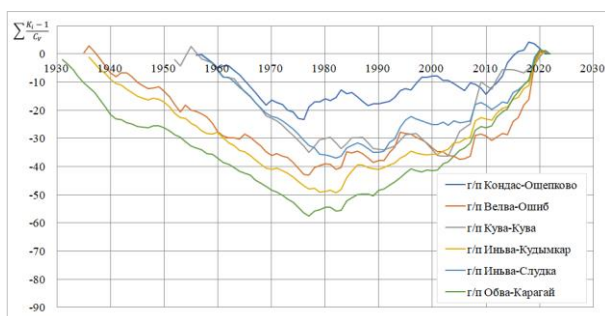
Весна IV–VI



Лето-осень VII–X

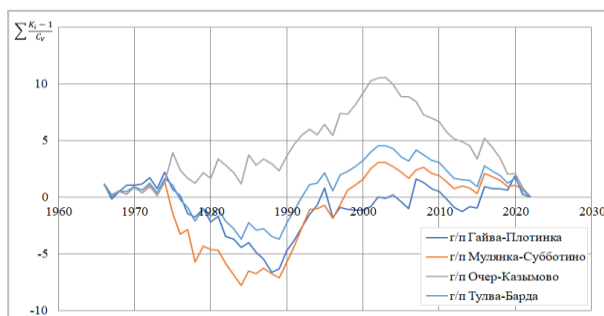


Зима XI–III

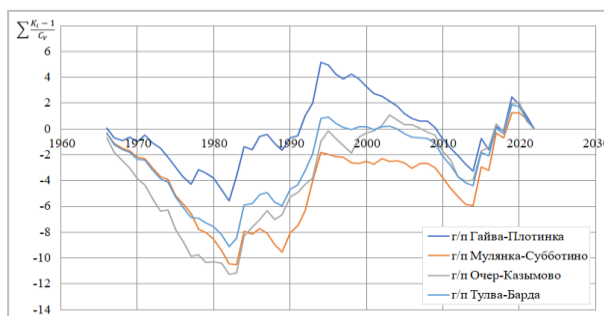


Юго-западный район

Весна IV–VI



Лето-осень VII–X



Зима XI–III

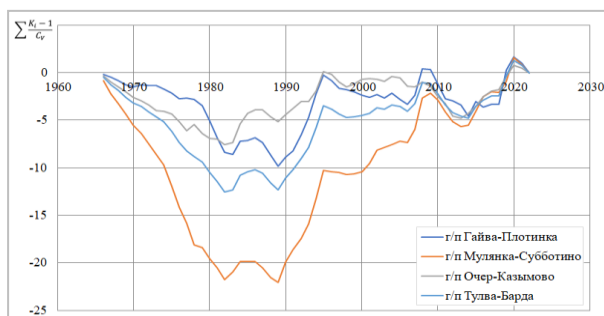


Рис. 3.9. Разностно-интегральные кривые сезонного стока для 4 и 5 районов

Оценка изменений сезонного стока рек. После выявления точки перегиба на РИК и оценки нарушения стационарности рядов многолетних наблюдений выполнена оценка перераспределения сезонного стока в % от годового для двух периодов: с 1956 г. до точки минимума и с точки минимума до 2022 г. Это дает возможность выявить перераспределение стока внутри сезонов и определить

период, имеющий наибольшее увеличение стока (табл. 3.8) (Механошина, Микова, 2025).

В целом для рек водосбора до начала выраженных изменений за период наблюдений с 1956 по 2022 гг. характерно следующее распределение сезонного стока в %: для горных районов (1 и 2) на весенний период в среднем приходится 71,4 %, летне-осенний – 20,1 %, зимний – 8,5 %. Для равнинных районов (3, 4, 5, 6) на весну в среднем составляет 74,4 %, летно-осень – 16,3 %, зиму – 9,4 %. После смены цикла водности произошло перераспределение стока внутри сезонов, которое стало соответствовать следующему соотношению в %: для горных районов (1 и 2) на весенний период *в среднем* приходится 66,8 %, летне-осенний период – 22,0 %, зимний – 11,2 %. Для равнинных районов (3, 4, 5, 6) весенний сток в среднем составляет 69,0 %, летне-осенний – 19,6 %, зимний – 11,3 %.

Сопоставление величин сезонного стока до и после начала выраженных климатических изменений дало возможность установить снижение весеннего стока в среднем по всей территории на 6,6 % (табл. 3.8).

Таблица 3.8

Процентное соотношение сезонного стока до и после начала выраженных изменений

№	Название района	Распределение речного стока по сезонам (в %) для периодов в таблице №3.6:						Разница между периодами, %		
		Весна	Лето-осень	Зима	Весна	Лето-осень	Зима	Весна	Лето-осень	Зима
		V–VI	VII–X	XI–III	V–VI	VII–X	XI–III	V–VI	VII–X	XI–III
1	Северный горный	69,2	21,5	9,4	66,3	21,9	11,8	-3,5	+1,2	+25,5
2	Южный горный	73,5	18,7	7,7	67,3	22,0	10,6	-7,5	+18,9	+23,4
3	Северный равнинный	74,3	17,6	8,1	71,8	18,5	9,8	-3,3	+5,1	+21,3
4	Центральный равнинный	81,1	13,0	5,9	73,7	17,4	8,8	-9,1	+34,1	+51,4
5	Южный восточный	74,6	16,5	8,9	69,6	19,8	10,5	-6,7	+20,8	+19,5
6	Южный западный	67,5	18,0	14,6	61,0	22,8	16,2	-9,6	+28,0	+11,9

В летне-осенний период наблюдается увеличение стока в среднем по всей территории на 18,0 %. Незначительное повышение стока в этот период характерно для серной части водосбора – *Северного равнинного и Северного горного районов* (от 1,2 % до 5,1 %). Для всех остальных районов установлено значительное повышения речного стока на 20,8–34,1 % с максимальными значениями в

Центральном равнинном районе.

Самое существенное увеличение стока на всей изучаемой территории характерно для зимнего периода – в среднем на 24 %. Наибольших значений оно составило на реках *Центрального равнинного района (4)* – 51,4 %. Анализ данных за периоды до и после начала выраженных климатических изменений показал повышение средних зимних температур воздуха. Это привело к сокращению продолжительности зимнего сезона и более частым оттепелям, которые вызывали таяние снега зимой и, как следствие, увеличивали количество воды, стекающей с поверхности водосборов в водные объекты. Таким образом, повышение зимних температур напрямую повлияло на увеличение объёма зимнего стока в исследуемом регионе (Механошина, Микова, 2025).

3.4. Влияние естественной зарегулированности речного стока на его внутригодовое распределение

Коэффициент естественной зарегулированности φ является одним из показателей, характеризующих неравномерность внутригодового распределения стока. В связи с этим необходимо оценить его влияние на внутригодовое распределение речного стока для территории водосбора Верхней и Средней Камы.

В гидрологии под естественной зарегулированностью речного стока понимается способность водосборного бассейна аккумулировать воду в фазы избыточного увлажнения (половодья, паводки) и отдавать в фазы низкого стока (межень), без участия инженерных сооружений (Михайлов, Добровольский, 1991). Согласно классическим представлениям естественная зарегулированность является интегральной характеристикой ландшафтной структуры бассейна, определяемой совокупностью природных факторов: озерностью, заболоченностью, лесистостью, а также гидрогеологическими условиями (Коронкевич, 1990).

В отличие от искусственной зарегулированности, природный механизм характеризуется пространственной распределенностью и временной инерционностью. Ряд авторов рассматривают естественную зарегулированность не только как свойство территории, но и как экосистемный фактор, обеспечивающий снижение рисков наводнений и поддержание санитарных попусков в меженный период.

Потребность в количественной оценке степени естественной зарегулированности стока появилась в связи с тем, что большой ряд чисел, отражающий характер внутригодового распределения стока по сезонам и месяцам, трудно использовать в различного рода эмпирических зависимостях. Поэтому в разное время исследователи использовали коэффициенты, учитывающие соотношение объемов стока или средних расходов воды за разные интервалы годового цикла (Комлев, 2002; Фролова и др., 2013).

В 1946 г. для численного выражения степени естественной зарегулированности Д.Л. Соколовским предложен коэффициент естественной зарегулированности стока φ , который представляет собой отношение площади гидрографа, расположенной ниже среднего расхода, к его общей площади. По мнению ученого естественная зарегулированность водосбора и его аккумулирующая способность вызывается наличием болот озер и водоудерживающей способностью почвы.

Коэффициент φ отражает величину базисного стока, выраженного в долях от единицы. Он применяется в основном для сравнительной характеристики разных рек или районов в отношении величины наиболее устойчивых «базисных» водных ресурсов. Для конкретной реки величина φ меняется год от года в зависимости от особенностей в первую очередь многоводной фазы водного режима (Комлев, 2002).

Для исследования возможных изменений водного режима необходимо выяснить роль отдельных физико-географических факторов и всего их комплекса в формировании внутригодовой изменчивости стока, обобщенным показателем которой является коэффициент естественной зарегулированности стока.

Внутригодовое распределение стока зависит от большого числа физико-географических параметров, находящихся в тесной взаимосвязи. В первую очередь величина φ определяется климатической зарегулированностью, то есть месячным ходом осадков и испарения, которая распределена по территории зонально и увеличивается с ростом общей увлажненности (Андреев, 1960; Балков, 1970). Последняя обычно учитывается нормой годового стока. Наряду с подчинением закону географической зональности, второй важной закономерностью является влияние площади водосбора на степень естественной зарегулированности стока. По В.Г. Андрееву (1960) зависимость между площадью водосбора F и коэффициентом φ описывается формулой вида:

$$\varphi = a + b \lg (F + 1) \quad (3.1)$$

Важным свойством параметра является его устойчивость по территории как на равнинных, так и в горных местностях (Андреянов, 1960; Бабкин, 1969; Евстигнеев, 1977). С ростом φ увеличивается асинхронность стокоформирующих процессов в разных частях бассейна и обычно возрастает доля наиболее зарегулированного подземного стока в общем речном. Значительную роль в формировании естественной зарегулированности стока играет характер подстилающей поверхности. Он влияет на ход осадков и испарения, а также трансформирует климатический сток путем заполнения и сработки регулирующих емкостей на поверхности бассейна и в его недрах.

В связи с выше изложенным для оценки влияния естественной зарегулированности речного стока на его ВГРС за каждый характерный по водности год по всем г/п были рассчитаны коэффициент естественной зарегулированности стока φ и максимальные значения доли стока (% от годового стока) за весенний период (IV-VI). Для расчета коэффициента φ использовались данные по суточным значениям расходов воды рек водосбора, полученные из соответствующих выпусков гидрологических ежегодников.

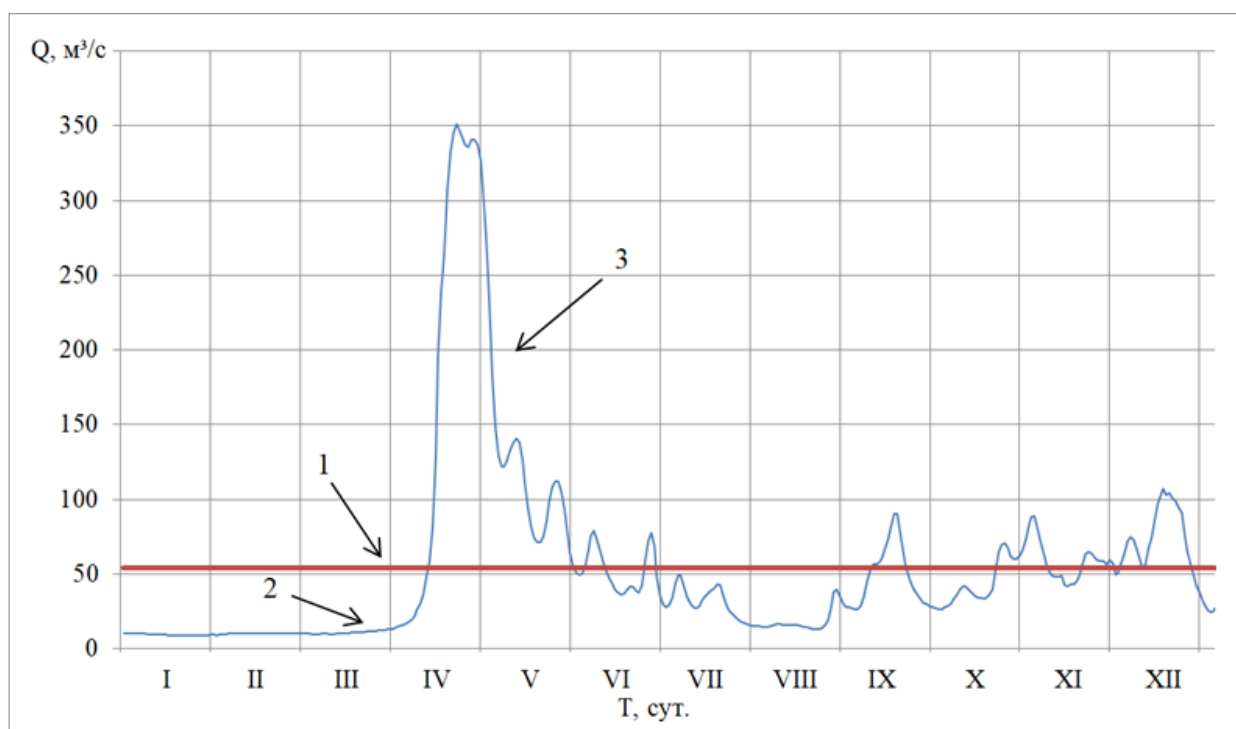


Рис. 3.10. Схема определения коэффициента φ на примере г/п р. Коса - с. Коса (2008 г.):
1 - ордината среднегодового стока, 2 - базисный сток, 3 - сток выше базисного

Для расчета коэффициента φ из точки, соответствующей среднегодовому расходу \bar{Q} , проводится ордината 1, отделяющая базисный сток (рис. 4.1). Большая часть ежедневных расходов полностью относится к базисному стоку (ниже линии 1).

В дни, когда расход превышает среднегодовой, базисная часть стока равняется \bar{Q} , а величина его превышения определяется как разность $Q_i - \bar{Q}$. Сумма этих превышений $\Sigma(Q_i - \bar{Q})$ будет соответствовать объему стока, превышающего базисный (рис. 3.10). Следовательно, коэффициент естественной зарегулированности φ стока представляет собой соотношение:

$$\varphi = \frac{\Sigma Q_i - \Sigma(Q_i - \bar{Q})}{\Sigma Q_i} \quad 3.2$$

Диапазон изменения величины φ рек водосбора находится в пределах 0,40–0,70, достигая максимальных значений на реках юго-западной части территории водосбора (рр. Иргина, Ирень, Очер, Мулянка, Гайва). В районах распространения карста коэффициент естественной зарегулированности находится в пределах 0,50–0,60. Для отдельных бассейнов рек, где закарстованность достигает 50% и более, характерен более выровненный режим стока. Также в значительной степени на характер естественной зарегулированности стока оказывают влияние площадь водосбора F , особенности рельефа, глубина расчленения речных долин, подстилающие породы, влияющие на условия питания подземных вод.

Поэтому для оценки влияния естественной зарегулированности стока рек на его внутригодовое распределение за все годы характерной водности были исследованы следующие зависимости: $\varphi = f(F)$, $\text{доля}_{IV-VI} = f(\varphi)$ для разных по размеру водосборов и разных типов гидрографов.

Зависимости коэффициента естественной зарегулированности от площади водосбора. Площадь водосбора оказывает заметное влияние на величину и равномерность стока. Чем больше площадь водосбора, тем сток более равномерен вследствие увеличения доли подземного питания. На больших водосборах более явно выражена зональность формирования стока, на малых водосборах существенный вклад вносят азональные факторы.

При одинаковых физико-географических условиях площадь водосбора может служить косвенным показателем величины подземного питания и межлетнего стока, а значит, как отмечает В.Г. Андреев (1960), выравнивает внутригодовое распределение стока. Это объясняется тем, что величина подземного питания реки зависит от характера водоносных горизонтов, их

мощности и водообильности, а также их расположения по отношению к эрозионному врезу.

Если рассматривать в целом реки водосбора за все группы водности, то с увеличением площади водосбора увеличивается и коэффициент естественной зарегулированности стока. Это объясняется тем, что с увеличением размеров водосбора увеличивается глубина эрозионного вреза и река дренирует большее количество подземных водоносных горизонтов. Это приводит к уменьшению влияния колебаний подземного питания на величину базисного стока.

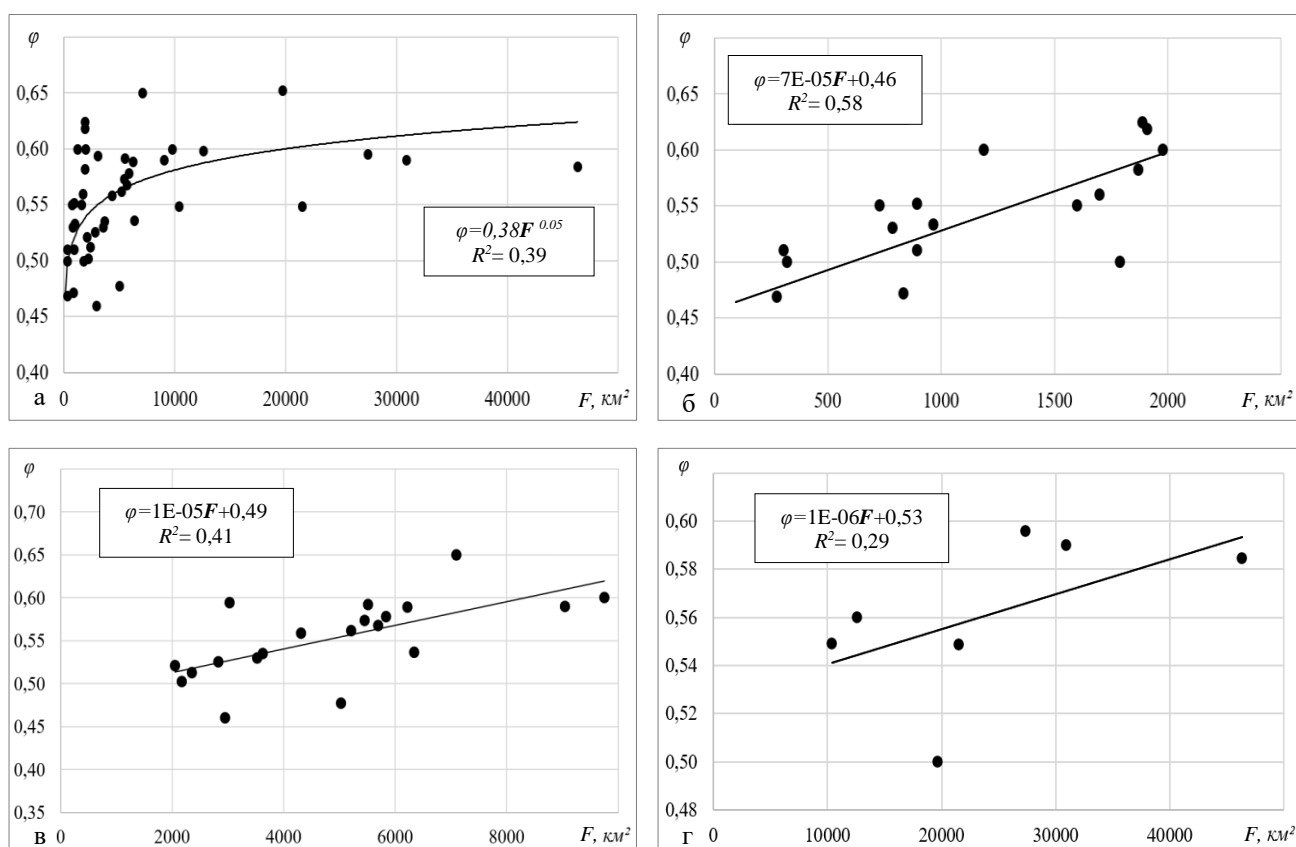


Рис. 3.11. Зависимость $\varphi_{cp} = f(F)$ для многоводной группы лет:

- а) в целом для водосбора Верхней и Средней Камы, б) для водосборов малых рек,
- в) для водосборов средних рек, г) для водосборов больших рек

В то же время увеличение коэффициента естественной зарегулированности стока наблюдается до определенных значений площади водосбора (8000-10000 км²). При дальнейшем увеличении площади водосбора коэффициент естественной зарегулированности стока меняется незначительно.

На примере многоводных лет это подтверждается полученными зависимостями $\varphi_{cp} = f(F)$ для разных по размерам водосборов: на малых и средних водосборах связь тесная $r = 0,76$ и $r = 0,65$ соответственно, а для больших

водосборов связь практически отсутствует $r = 0,53$ (табл. 3.9, рис. 3.11 б, в, г).

Если рассматривать средние и маловодные годы, то для рек водосбора выявленные закономерности полностью подтвердились (табл. 3.9).

Таблица 3.9

Коэффициенты корреляции для зависимости (r): $\varphi_{cp} = f(F)$

Размер водосбора \ Годы	Многоводные годы	Средние по водности годы	Маловодные годы
Малые ($F \leq 2000 \text{ км}^2$)	0,76	0,81	0,98
Средние ($2000 < F \leq 9500 \text{ км}^2$)	0,65	0,71	0,95
Большие ($9500 < F \leq 50000 \text{ км}^2$)	0,53	0,48	0,87

Зависимости доли стока весеннего половодья от коэффициента естественной зарегулированности стока для разных по размеру водосборов.

Главной фазой и отличительной чертой водного режима рек водосбора является весеннее половодье, на долю которого приходится 60-80% годового стока. Поэтому целесообразно рассмотреть зависимость доли стока за весенний период (IV- VI) от коэффициента естественной зарегулированности стока φ для разных по размерам водосборов.

Для оценки влияния естественной зарегулированности стока φ на сток весеннего периода (IV-VI) за каждый характерный по водности год для каждого г/п были вычислены коэффициенты, определены значения доли стока (% от годового) за весенний период и сгруппированы по размеру площади водосборов.

Таблица 3.10

Коэффициенты корреляции r зависимости: $доля_{IV-VI} = f(\varphi)$ в многоводные годы

Размер водосбора	Многоводные годы												
	1971	1978	1979	1984	1986	1990	1993	1994	2002	2007	2008	2017	2019
Все	0,31	0,88	0,65	0,56	0,45	0,67	0,93	0,74	0,60	0,70	0,58	0,53	0,61
Малые	0,44	0,88	0,69	0,64	0,50	0,82	0,89	0,83	0,72	0,79	0,74	0,83	0,72
Средние	0,05	0,86	0,66	0,65	0,56	0,51	0,92	0,82	0,59	0,75	0,56	0,43	0,55
Большие	0,31	0,94	0,80	0,73	0,77	0,70	0,96	0,58	0,51	0,56	0,44	0,33	0,57

Анализируя зависимости $доля_{IV-VI} = f(\varphi)$ как для многоводных лет (рис. 3.12), так и для средних и маловодных, можно увидеть, что доля стока за период

весеннего половодья обратно пропорциональна величине естественной зарегулированности стока.

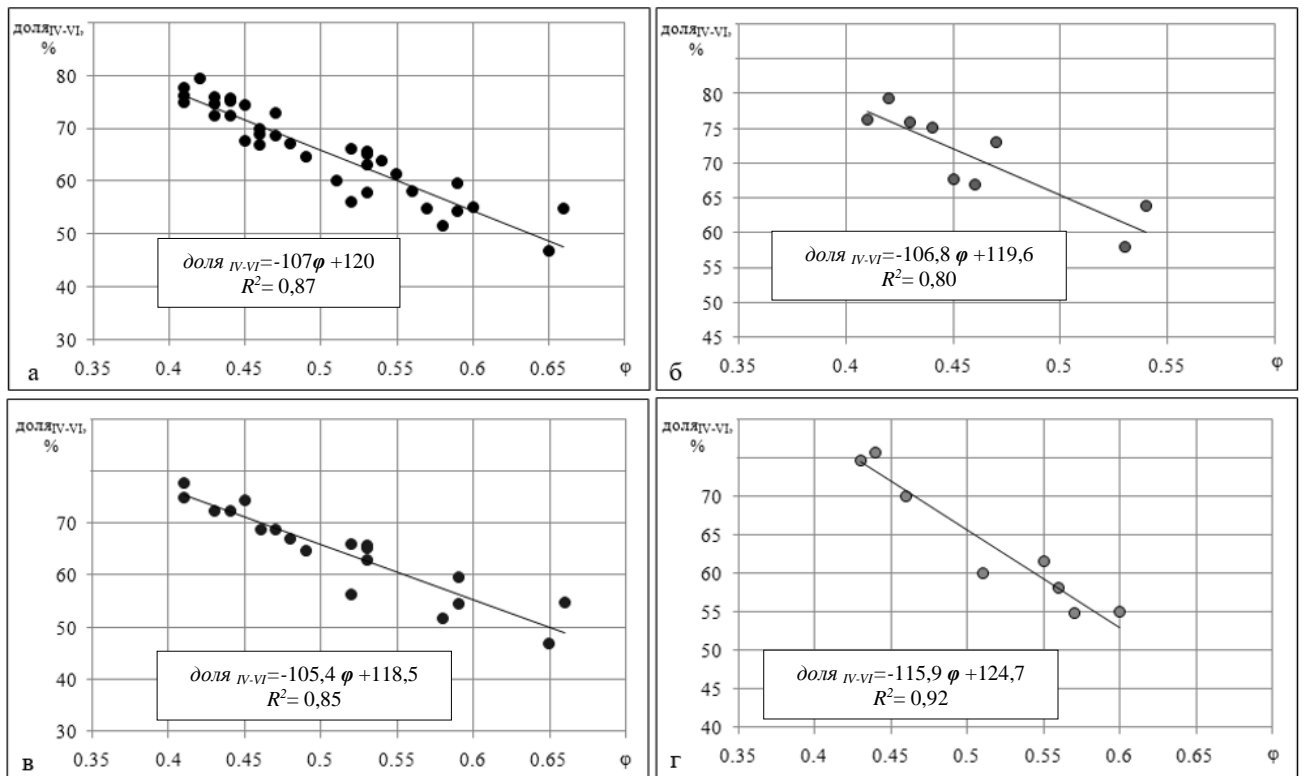


Рис. 3.12. Зависимость доли IV-VI = $f(\phi)$ для многоводной группы лет (1993 г.):

- а) в целом для рек водосбора, б) для водосборов малых рек,
- в) для водосборов средних рек, г) для водосборов больших рек

Таблица 3.11

Коэффициенты корреляции r зависимости: $доля_{IV-VI} = f(\phi)$ в средние по водности годы

Размер водосбора	Средние по водности годы									
	1968	1972	1981	1983	2009	2000	2003	2004	2006	2009
Все	0,78	0,71	0,83	0,89	0,78	0,77	0,73	0,74	0,30	0,61
Малые	0,87	0,74	0,88	0,83	0,87	0,86	0,86	0,86	0,86	0,78
Средние	0,75	0,67	0,75	0,81	0,41	0,73	0,74	0,54	0,08	0,65
Большие	0,84	0,94	0,77	0,74	0,73	0,30	0,48	0,65	0,32	0,32

Полученные результаты объясняется тем, что при возрастании площади водосбора увеличивается естественная зарегулированность стока и, соответственно, уменьшается доля стока весеннего половодья. На величину стока средних и больших водотоков основное влияние оказывают зональные факторы (климат, ландшафт и др.), на сток же малых рек существенно влияют и азональные факторы. За средние и маловодные годы, выявленные закономерности полностью подтвердились.

Коэффициенты корреляции r зависимости: $доля_{IV-VI} = f(\varphi)$ в маловодные годы

Размер водосбора	Маловодные годы									
	1970	1973	1975	1976	1977	1982	1988	2010	2011	2012
Все	0,93	0,83	0,97	0,97	0,90	0,98	0,95	0,87	0,81	0,91
Малые	0,88	0,89	0,99	0,98	0,90	0,98	0,98	0,89	0,89	0,89
Средние	0,94	0,83	0,97	0,95	0,91	0,99	0,87	0,78	0,80	0,93
Большие	0,82	0,82	0,97	0,96	0,86	0,96	0,95	0,98	0,76	0,81

Наибольшее влияние естественная зарегулированность оказывает на долю стока в весенний период в маловодные годы (табл. 3.12), поскольку именно в эти годы сток сформирован главным образом за счет весеннего половодья и в питание рек преобладает грунтовые воды (Механошина, 2018; Калинин и др., 2018; 2019).

Выводы:

Разделение территории по преобладающему типу гидрографа обусловлено зональным характером распределения метеорологических факторов, которое определяет величину стока в характерные фазы водного режима. На реках водосбора наблюдаются три характерных типа гидрографа:

- 1-й тип – высокое продолжительное весеннее половодье и паводки в теплую часть года;
- 2-й тип – высокое весеннее половодье и незначительные или отсутствующие летне-осенние паводки;
- 3-й тип – невысокое весеннее половодье и значительные летне-осенние паводки.

Оценка гидрографов за средние и маловодные годы показала, что внутригодовое распределение стока рек водосбора Верхней и Средней Камы соответствует типизации, предложенной на основе исследования ВГРС рек за многоводные годы. При этом были уточнены границы пространственного распределения типов гидрографов. Таким образом, используемый метод является справедливым при оценке внутригодового распределения стока рек.

Для территории водосбора существует две схемы гидрологического районирования, которые значительно отличаются друг от друга, как по количеству выделенных таксономических единиц, так и по местоположению их границ. Группировка гидрографов по таксонам, приведенным в Ресурсах...

(1973), показала несоответствие сроков начала, максимума, окончания весеннего половодья и летне-осенних дождевых паводков на разных реках вследствие сильной генерализации районов. При использовании схемы районирования А.С. Шкляева (Краткий справочник ..., 1966) в округа попадает очень мало (1-5) центров тяжести водосборов рек, на которых организованы наблюдения за стоком, что затрудняет проведение анализа ВГРС.

Объединение гидрографов в группы по соответствию сроков начала, максимума, окончания весеннего половодья и летне-осенних дождевых паводков, а также значений доли их месячного стока в годовом явилось критерием районирования территории водосбора по однородности внутригодового распределения стока. В результате получена новая схема гидрологического районирования исследуемой территории.

Оценка качества расчетов среднегодового объема воды на независимом материале по реке-аналогу, выбранному с учетом схемы гидрологического районирования, показала, что ошибка вычислений искомой характеристики не превышает 9,8%.

С конца XIX в. – начала XX в. на территории водосбора наблюдалось синхронное и продолжительное увеличение среднесезонной температуры воздуха. Момент начала выраженных изменений и цикла роста приходится в среднем на период 1986–1988 гг. Анализ многолетней ритмики сезонных значений атмосферных осадков показал, что их колебания настолько разнообразны и изменчивы по территории, что практически невозможно выявить момент начала выраженных изменений не только для всего водосбора, но и по однородным районам.

Оценка долговременных циклов и фаз водности сезонного стока показала, что момент начала выраженных изменений в гидрологических рядах в среднем в весенний период приходится на 1988–1989 гг., в летне-осенний и зимний сезоны на 1977 г.

Проверка гипотезы влияния климата на речной сток показала, что построенные модели для исследуемых метеорологических станций и гидрологических постов по сезонам оказались статистически значимыми для средней температуры воздуха и стока только для зимнего периода. Сопоставление выявленных процентных соотношений сезонного стока до и после начала выраженных изменений дало возможность установить уменьшение стока в весенний период и значительное увеличение летне-осеннего и зимнего стока.

Одним из показателей неравномерности внутригодового распределения стока является коэффициент естественной зарегулированности φ , который отражает величину базисного стока, выраженного в долях от единицы (Соколовский, 1946). Для конкретной реки величина φ меняется год от года в зависимости от особенностей, в первую очередь, многоводной фазы водного режима.

С увеличением площади водосбора увеличивается естественная зарегулированность стока. Это увеличение наблюдается до определенных значений площади водосбора (8000–10000 км²). При дальнейшем увеличении площади коэффициент естественной зарегулированности стока меняется незначительно.

Доля стока за период весеннего половодья (IV-VI) тесно связана с естественной зарегулированностью стока. С увеличением естественной зарегулированности стока доля стока весеннего половодья уменьшается. Наибольшее влияние естественной зарегулированности стока на формирование весеннего стока прослеживается на малых водосборах в многоводные и средние по водности годы, и на всей исследуемой территории в маловодные годы.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ В РАЗНЫЕ ПО ВОДНОСТИ ГОДЫ

Выявленные закономерности внутригодового распределения стока рек водосбора Верхней и Средней Камы показали, что за период весеннего половодья формируется от 60 до 80% годового стока. Данный период является главной фазой водного режима. Поэтому изучение закономерностей формирования весеннего половодья представляет наибольший интерес в ВГРС. Процесс формирования стока весеннего половодья является одним из наиболее сложных гидрологических явлений, зависящий от большого числа зональных и аazonальных факторов. Исследование факторов, определяющих величину и изменчивость стока весеннего половодья, составляет одну из главных задач для разработки методов гидрологических прогнозов и расчетов и эффективного управления водными ресурсами.

4.1 Особенности формирования весеннего половодья на реках Верхней и Средней Камы в разные по водности годы

Для анализа особенностей прохождения весеннего половодья на реках водосбора за каждый год характерной водности по ближайшей к гидрологическому посту метеорологической станции были собраны данные о среднесуточной температуре воздуха и осадках для определения сроков начала, окончания и максимума половодья, оценка которых проводилась по построенным комплексным графикам для каждого гидрологического поста за каждый год.

По ежедневным расходам воды, среднесуточной температуре воздуха и осадкам были установлены:

- $D_{нач}$ – дата начала весеннего половодья. Определялась как дата, с которой начинается стабильное и интенсивное увеличение уровня воды, устанавливается по точке перегиба на кривой графика уровня воды (без учёта мелких её неровностей);
- $D_{наиб(Q)}$ – дата наступления наибольшего расхода воды в период весеннего половодья;
- $D_{кон}$ – дата окончания весеннего половодья. Определялась как дата в конце

кривой спада, когда интенсивность спада уже резко снизилась в результате окончания стока основных объемов талых вод, однако также следует учитывать распределение температуры и осадков (Научно-прикладной справочник..., 2015);

- T – продолжительность весеннего половодья, дни.

Результаты проведенных исследований за характерные по водности годы показали, что в многоводные годы половодье наблюдается в среднем на 3-4 дня раньше, чем в средние и в маловодные годы (табл. 4.1). Амплитуда колебания сроков начала фазы составляет 28 дней для многоводной, 21 день – для средней по водности группы лет и 16 дней – для маловодной.

Таблица 4.1

Характеристики весеннего половодья на реках водосбора водосбора Верхней и Средней Камы за характерные по водности годы

Характерные по водности годы	$D_{нач}$	D_{Qmax}	$D_{кон}$	T
Многоводные	01.04 – 29.04	13.04 – 20.05	17.05 – 01.07	53
Средние по водности	04.04 – 25.04	12.04 – 17.05	12.05 – 19.06	44
Маловодные	05.04 – 21.04	12.04 – 08.05	06.05 – 09.06	41

Ранние даты формирования максимальных среднесуточных расходов воды одинаковы для всех групп водности, в то же время поздние даты смещаются в позднюю сторону при увеличении водности года. Так, например, в многоводные годы поздняя дата наступления максимальных срочных расходов воды приходится на 20 мая, а в маловодные – на 8 мая. Амплитуда колебания сроков наступления пика весеннего половодья составляет 38 дней у многоводных, 35 дней – у средних по водности и 27 дней – у маловодных лет. Амплитуда ранних и поздних дат окончания весеннего половодья больше всего подвержена изменению. В многоводные годы дата окончания весеннего половодья приходится на вторую декаду мая – начало июля, амплитуда колебания составляет 46 дней, в зависимости от площади водосбора. В средние и маловодные годы окончание весеннего половодья наблюдается с мая по июнь. Амплитуда колебания составляет 36 дней для средней группы лет и 30 дней – для маловодной.

Наибольшая продолжительность весеннего половодья на реках наблюдается в многоводные годы (53 дня), далее со снижением водности сокращается и в средние и маловодные годы составляет 44-41 день. В средние по водности годы продолжительность половодья на исследуемых реках изменялась

от 26 до 62 дней. При этом на г/п Кама – Бондюг, имеющем наибольшую площадь водосбора ($F=46602 \text{ км}^2$), продолжительность весеннего половодья одна из наибольших (60 дней). С уменьшением площади водосбора рек сокращается и продолжительность весеннего половодья. Так, на г/п Чусовая – Лямино ($F=21500 \text{ км}^2$) и Сылва – Подкаменное ($F=19543 \text{ км}^2$) площадь водосбора в два раза меньше, чем на г/п Кама – Бондюг, при этом продолжительность весеннего половодья сократилась всего на 10-12 дней (Механошина, Никитина, 2022, 2023).

Оценка влияния рельефа на весеннее половодье рек в разные по водности годы. Рельеф оказывает значительное влияние на процессы формирования стока весеннего половодья. Он определяет пространственное перераспределение выпадающих осадков, задержание талых вод на поверхности и в толще водосбора, испарение и время добегания склонового и руслового стока, что в свою очередь также отражается и на продолжительности фазы весеннего половодья. Рассмотрим, как изменяются сроки прохождения весеннего половодья на разных по рельефу водосборах в разные по водности годы.

Таблица 4.2

Характеристики весеннего половодья на горных и равнинных реках водосбора Верхней и Средней Камы за характерные по водности годы

Рельеф водосбора	$D_{нач}$	$D_{Q_{max}}$	$D_{кон}$	T
<i>Многоводные годы</i>				
Равнинный	01.04 – 18.04	13.04 – 13.05	17.05 – 21.06	51
Горный	05.04 – 29.04	01.05 – 20.05	23.05 – 01.07	54
<i>Средние по водности годы</i>				
Равнинный	04.04 – 17.04	12.04 – 10.05	12.05 – 12.06	42
Горный	10.04 – 25.04	27.04 – 17.05	17.05 – 19.06	46
<i>Маловодные годы</i>				
Равнинный	05.04 – 16.04	12.04 – 05.05	06.05 – 02.06	39
Горный	07.04 – 21.04	21.04 – 08.05	11.05 – 09.06	43

Из таблицы 4.2 видно, что даты начала, пика и окончания весеннего половодья в разные по водности годы на горных реках смещаются в позднюю сторону по сравнению с равнинными.

В многоводные годы половодье на равнинных реках наблюдается в среднем на 4 дня раньше, чем на горных реках. В средние по водности годы разница наступления дат для разных по высоте водосборов составляет 6 дней, у маловодных лет – 2 дня. Амплитуда колебания сроков наступления половодья на равнинных

реках меньше. Так, сроки наступления фазы по каждой группе водности изменяются от 11 до 17 дней на равнинных реках и от 14 до 24 дней – на горных.

Ранние даты формирования максимальных срочных расходов воды на равнинных реках одинаковы для всех групп водности. На горных реках, наблюдается смещение ранних дат в позднюю сторону с увеличением водности. Так, например, в многоводной группе лет ранняя дата наступления максимального расхода воды – 01 мая, а у маловодной группы – 21 апреля. Поздние даты наступления пика половодья для разных по высоте водосборов аналогично смещаются в позднюю сторону с увеличением группы водности. Таким образом, прохождение весеннего половодья в разные по водности годы различно. Независимо от группы водности, характерные сроки весеннего половодья у горных рек смещаются в позднюю сторону в отличие от равнинных рек. Такое смещение в разные по водности годы в основном связано с многолетними изменениями климатических факторов. Особое влияние оказывают атмосферные осадки (жидкие и твердые) и температура воздуха. Нарастание положительных температур воздуха, не прерываемых появлением отрицательных температур воздуха даже в ночное время, увеличивает общую сумму положительных суточных температур воздуха и уменьшает период снеготаяния. При таком дружном снеготаянии весеннее половодье представляет собой высокую волну. С двумя или несколькими пиками половодье формируется в период затяжного таяния снега, дополнительно сопровождающееся возвращением отрицательных температур воздуха и дождевыми паводками в весенний период. Как правило, сложная форма гидрографа характерна для горных рек. На равнине в пределах лесной зоны наряду с многопиковыми половодьями наблюдаются и стройные однопиковые половодья, типичные для рек южных лесостепных районов.

Разница в продолжительности прохождения половодья для каждой группы водности у горных и равнинных рек составляет 1-3 дня. Продолжительность весеннего половодья в многоводные годы составляет в среднем 51 день, в средние по водности – 44 дня и в маловодные годы – 41 день (Механошина и др., 2025).

4.1.1 Оценка влияния морфометрических характеристик водосбора рек на продолжительность весеннего половодья

Климатические факторы являются главными в формировании весеннего половодья и определяют количество воды, образующееся в результате

снеготаяния и выпадения дождей в период главной фазы водного режима рек исследуемой территории, при этом геоморфологические факторы трансформируют ее запасы во времени и по территории водосбора реки, определяя потери воды на водосборе и время ее добегания до расчетного створа. Поэтому после выявления особенностей прохождения весеннего половодья в разные по водности годы была выполнена оценка влияния морфометрических факторов на его продолжительность с помощью парных корреляций.

В качестве факторов, которые оказывают влияние на продолжительность весеннего половодья исследованы: площадь водосбора (F , км²), средняя высота водосбора (H_{cp} , м.абс), уклон главного водотока ($I_{гв}$, ‰) и средний уклон водосбора (I_{cp} , ‰). Источником информации о морфометрических характеристиках водосбора послужила монография В.Г. Калинина и С.В. Пьянкова (2010).

В дальнейшем, для оценки совокупного влияния морфометрических факторов использована модель множественной линейной регрессии. Для этого вначале выполнена оценка коллинеарности исследуемых характеристик. Коллинеарность нарушает условие независимости используемых факторов и приводит к дублированию факторами друг друга. Принято, что факторы коллинеарны, в случае если коэффициент корреляции между ними по модулю превышает 0,70. В результате выявлено, что средний уклон водосбора и средняя высота водосбора являются коллинеарными ($r=0,78$), когда равнинные и горные реки анализируются вместе. Поэтому при анализе совокупного влияния морфометрических факторов на продолжительность весеннего половодья для всех рек (общая зависимость для равнинных и горных рек) данные показатели будут использованы по-отдельности. При разделении рек на равнинные и горные коллинеарности между факторами выявлено не было.

Площадь водосбора (F , км²). При использовании одного фактора для установления зависимостей с продолжительностью весеннего половодья наилучшая теснота связи получена с площадью водосбора. Парные коэффициенты корреляции (r) изменяются в пределах 0,61-0,90. Наибольшая теснота связи наблюдается у равнинных рек (0,76-0,90), для горных - связь ниже (0,61-0,70). Все зависимости имеют положительные коэффициенты корреляции, то есть чем больше площадь водосбора реки, тем больше продолжительность и наоборот. С территории больших водосборов вода с самой удаленной части

водосбора и до замыкающего створа добегают дольше, чем с небольших водосборов. Также большие водосборы часто расположены в разных климатических зонах, что приводит к неодинаковому количеству осадков, неравномерному таянию снега и более долгому добеганию воды до замыкающего створа. Площадь водосбора является определяющим фактором, влияющим на время нахождения воды на водосборе.

Средний уклон водосбора ($I_{ср}$, ‰). Зависимости продолжительности половодья от среднего уклона водосбора обратные ($r = -0,22 \div -0,85$). Водосборы с большим средним уклоном способствуют более быстрому стоку воды в реку. Это приводит к более резкому и непродолжительному подъему половодья, так как вода быстрее дотекает до замыкающего створа. На водосборах с меньшим уклоном вода стекает по поверхности дольше, что удлиняет период половодья. Данная характеристика является важным фактором, определяющим скорость стекания воды на водосборе и продолжительность весеннего половодья.

Уклон главного водотока ($I_{гп}$, ‰). Зависимости, построенные от уклона главного водотока, имеют обратный характер ($-0,10 \div -0,59$), то есть чем больше уклон, тем меньше продолжительность весеннего половодья. Большие уклоны главного водотока приводят к быстрому стоку воды по руслу реки, что сокращает продолжительность половодья. Вода быстрее стекает по речной системе на нижерасположенные участки. Данная величина характеризует продолжительность стока воды только по руслу реки.

Средняя высота водосбора ($H_{ср}$, м.абс). Самые низкие коэффициенты корреляции ($-0,29 \div -0,25$) получены со средней высотой водосбора (табл. 4.3). Вероятно, это происходит потому, что данный фактор влияет не напрямую на время добегания воды до замыкающего створа, а опосредовано через другие факторы. Так, например, чем выше водосбор, тем больше в зимний период будет накапливаться снега и, дольше будут наблюдаться низкие температуры воздуха весной. Это может привести к более длительному таянию снега и продолжительному поступлению воды с водосбора в речную сеть.

Для выявления совместного влияния исследуемых характеристик водосбора на продолжительность половодья была использована последовательная комбинация факторов двух, трех и четырех переменных (табл. 4.3). Выбор наилучшего сочетания морфометрических характеристик водосбора выполнен по коэффициентам множественной регрессии (R).

Коэффициенты тесноты связи (R) регрессионной модели продолжительности
весеннего половодья (T) от морфометрических характеристик водосбора

Характеристики водосбора	<i>Max</i>	<i>Mid</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Mid</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Mid</i>	<i>Min</i>
	Все реки			Равнинные реки			Горные реки		
F	0,82	0,73	0,74	0,90	0,76	0,83	0,63	0,70	0,61
H_{cp}	0,05	0,18	0,25	-0,25	0,04	-0,08	-0,29	-0,17	0,01
$I_{2л}$	-0,40	-0,22	-0,21	-0,58	-0,56	-0,59	-0,10	0,26	0,28
I_{cp}	-0,30	-0,17	-0,15	-0,70	-0,78	-0,85	-0,67	-0,27	-0,22
$H_{cp} + I_{cp}$	-	-	-	0,70	0,83	0,86	0,67	0,27	0,25
$H_{cp} + I_{2л}$	0,41	0,30	0,35	0,59	0,58	0,59	0,30	0,32	0,28
$I_{cp} + I_{2л}$	0,44	0,24	0,23	0,75	0,81	0,88	0,68	0,43	0,41
$F + H_{cp}$	0,82	0,75	0,78	0,94	0,76	0,84	0,65	0,70	0,63
$F + I_{cp}$	0,82	0,73	0,74	0,93	0,88	0,96	0,81	0,70	0,61
$F + I_{2л}$	0,82	0,73	0,74	0,91	0,79	0,86	0,64	0,86	0,79
$F + H_{cp} + I_{cp}$	-	-	-	0,95	0,90	0,96	0,81	0,70	0,64
$F + H_{cp} + I_{2л}$	0,82	0,75	0,78	0,94	0,80	0,86	0,66	0,86	0,80
$F + I_{cp} + I_{2л}$	0,82	0,73	0,74	0,94	0,89	0,96	0,83	0,87	0,80
$H_{cp} + I_{cp} + I_{2л}$	-	-	-	0,75	0,86	0,89	0,68	0,43	0,43
$F + H_{cp} + I_{cp} + I_{2л}$	-	-	-	0,96	0,91	0,97	0,83	0,87	0,82

Примечание: *Max* – многоводные годы; *Mid* – средние по водности годы; *Min* – маловодные годы. Для зависимостей с одним фактором рассчитаны коэффициенты парной корреляции, для зависимостей с двумя и более факторами рассчитаны коэффициенты множественной регрессии. **Жирным шрифтом** выделены наилучшие зависимости.

При использовании двух переменных лучший результат получен для комбинации площади водосбора и среднего уклона водосбора ($F + I_{cp}$) как для равнинных, так и для горных рек. При этом теснота связи увеличилась существенно, особенно для равнинных рек с 0,76-0,90 до 0,88-0,93. У горных рек существенное улучшение отмечается для многоводных лет с 0,63 до 0,81. Для регрессионной модели, где использованы все реки, незначительное уточнение тесноты связи наблюдается при совместном использовании площади водосбора и средней высоты водосбора ($F + H_{cp}$) для средних по водности (с 0,73 до 0,75) и маловодных лет (с 0,74 до 0,78).

Введение третьей переменной существенно уточнило тесноту связи для горных рек. Наилучшей комбинацией факторов оказалось совместное использование площади водосбора, среднего уклона водосбора и уклона главного водотока ($F+I_{cp}+I_{zl}$). Для равнинных рек также прослеживается небольшое уточнение связи, при использовании в качестве факторов площади водосбора, средней высоты водосбора и среднего уклона водосбора ($F+H_{cp}+I_{cp}$). У регрессионных моделей, рассчитанных для всех рек, введение третьей переменной не принесло уточнения.

Регрессионные модели, полученные от четырех факторов для всех типов рек, не имеют существенного улучшения тесноты связи, следовательно, использование всех факторов для расчета продолжительности весеннего половодья не имеет смысла.

В таблицу 4.4 из 4.3 помещены коэффициенты тесноты связи (R) наилучших регрессионных моделей.

Таблица 4.4

Характеристики наилучших регрессионных моделей для расчета продолжительности весеннего половодья

Характеристики водосбора	Многоводные годы			Средние по водности годы			Маловодные годы		
	R	NSE	δ	R	NSE	δ	R	NSE	δ
Все реки									
F	0,82	0,67	3,9	0,73	0,53	4,9	0,74	0,54	4,7
$F+H_{cp}$	0,82	0,67	3,9	0,75	0,56	4,8	0,78	0,60	4,4
$F+H_{cp}+I_{zl}$	0,82	0,67	4,0	0,75	0,56	4,8	0,78	0,61	4,4
Равнинные реки									
F	0,90	0,80	3,5	-	-	-	-	-	-
I_{cp}	-	-	-	-0,78	0,61	5,0	-0,85	0,72	3,9
$F+I_{cp}$	0,93	0,87	3,0	0,88	0,78	3,6	0,96	0,92	2,0
$F+H_{cp}+I_{cp}$	0,95	0,91	2,6	0,90	0,91	3,1	0,96	0,93	2,0
$F+H_{cp}+I_{cp}+I_{zl}$	0,96	0,91	2,3	0,91	0,83	2,8	0,97	0,94	1,8
Горные реки									
F	0,63	0,40	4,0	0,70	0,49	4,0	0,61	0,37	4,0
$F+I_{cp}$	0,81	0,65	4,0	0,70	0,49	4,0	0,61	0,37	4,0
$F+I_{cp}+I_{zl}$	0,83	0,69	4,0	0,87	0,76	4,0	0,80	0,64	4,0
$F+H_{cp}+I_{cp}+I_{zl}$	0,83	0,69	4,0	0,87	0,76	4,0	0,82	0,67	4,0

Примечание: R – коэффициент множественной регрессии (для зависимостей с одним фактором – коэффициенты парной корреляции); NSE – критерий Нэша-Сатклиффа; δ – средняя по модулю ошибка расчета, сут. **Жирным шрифтом** выделены лучшие зависимости.

Выбор оптимального сочетания морфометрических характеристик водосбора для расчета продолжительности половодья выполнен с учетом критерия Нэша-Сатклиффа (NSE) и средней ошибки расчета по модулю (δ).

В случае если при включении в расчет дополнительной переменной критерий Нэша-Сатклиффа не изменялся или становился меньше, то сочетание характеристик признавалось неудачным. Также анализировалось изменение средней по модулю ошибки расчета, если ошибка расчета с включением новых переменных не снижалась, а росла, то использование дополнительных переменных не имело смысла.

Оценка моделей множественной линейной регрессии, рассчитанная для всех рек (равнинные и горные вместе), показала, что в многоводные годы наилучшая теснота связи установлена с площадью водосбора (F). В средние по водности и маловодные годы наилучшая регрессионная модель получена с площадью водосбора и средней высотой водосбора ($F+H_{cp}$). Критерий Нэша-Сатклиффа соответствует «удовлетворительному» ($0,50 < NSE \leq 0,70$) качеству моделей (табл. 4.4). Средняя ошибка расчета по модулю составила 3,9-4,8 дней.

У равнинных рек для многоводных и средних по водности лет наилучшая комбинация факторов из трех переменных ($F+H_{cp}+I_{cp}$), для маловодных лет из двух переменных ($F+I_{cp}$). Эти регрессионные модели имеют «очень хорошее» качество ($NSE=0,91-0,92$). Средняя ошибка расчета по модулю составила 2,0-3,1 день. У горных рек наилучшая комбинация факторов получена с площадью водосбора, уклонами водосбора и уклонами главной реки ($F+I_{cp}+I_{гп}$). Регрессионные модели соответствуют «хорошему» и «удовлетворительному» качеству ($NSE=0,64-0,76$). Средняя ошибка расчета по модулю составила 4,0 дня.

Также была оценена степень тесноты связи фактической продолжительности весеннего половодья (T) и рассчитанной (T') с помощью коэффициента детерминации R^2 , меняющегося от 1 (функциональная связь) до 0 (отсутствие связи).

Для равнинных рек связь получилась высокой ($R^2=0,81-0,92$). Такие регрессионные модели хорошо описывают фактические данные. Для горных рек степень тесноты связи ниже ($R^2=0,64-0,76$), поэтому данные регрессионные модели могут описать только 64-76% вариаций зависимой переменной (рис. 4.1).

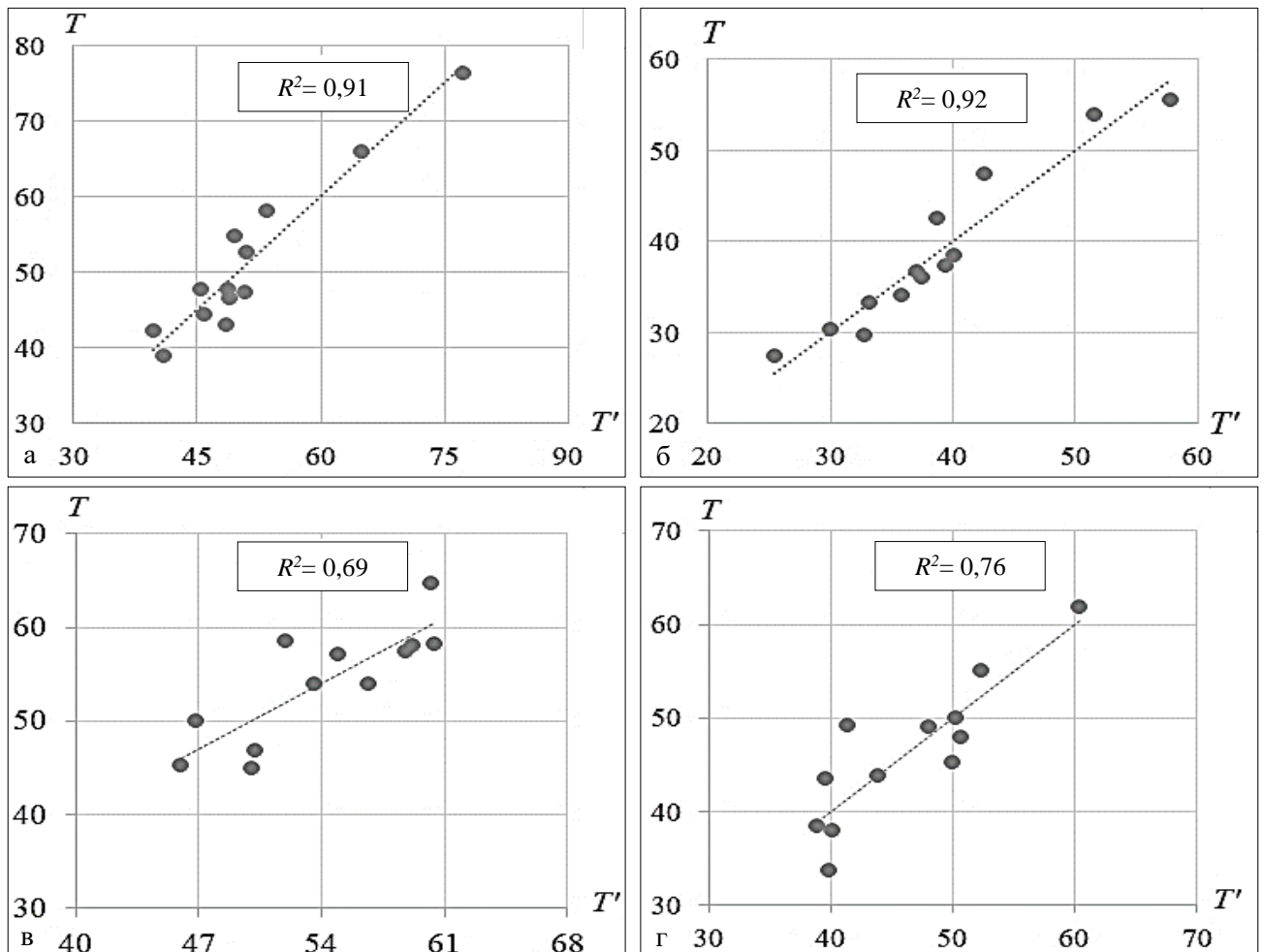


Рис. 4.1. Связь фактической (T , дни) и рассчитанной (T' , дни) продолжительности весеннего половодья: *Равнинные реки* (а) многоводные годы $T=f(F+H_{cp}+I_{cp})$ (б) маловодные годы $T=f(F+I_{cp})$ *Горные реки* (в) многоводные годы $T=f(F+I_{cp}+I_{cp})$ (г) средние годы $T=f(F+I_{cp}+I_{cp})$

Оценка зависимостей свидетельствует о хорошем воспроизведении продолжительности весеннего половодья для равнинных и горных рек в годы разной водности, что подтверждает возможность использования разработанных моделей множественной линейной регрессии для оценки длительности половодья на неизученных водосборах рек.

4.2 Оценка влияния основных факторов на формирование стока весеннего половодья

Для оценки влияния основных факторов на формирование стока весеннего половодья на реках водосбора за каждый год характерной водности по ближайшей к гидрологическому посту метеорологической станции были дополнительно собраны нижеперечисленные метеорологические независимые переменные (факторы):

- S_{max} – величина максимального запаса воды в снеге перед началом снеготаяния, мм слоя воды;

- Σt_+ – сумма положительных температур от даты перехода температуры воздуха через 0°C к положительным значениям до даты начала интенсивного подъема уровня воды, $^{\circ}\text{C}$;

- $\Sigma x_{весна}$ – сумма осадков за период весеннего половодья, мм;

- $U_{сент}$ – осеннее увлажнение, принималась величина суммы осадков осенью за предыдущий год до устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C к отрицательным значениям). Величина суммы осадков рассчитывалась от 1 сентября (мм).

В качестве зависимой переменной был выбран слой стока Y , мм, для этого были выполнены расчеты по определению количества воды, стекающей с поверхности водосборного бассейна за период весеннего половодья, и построены зависимости с каждым факторов в отдельности за каждый по водности год (рис 4.2).

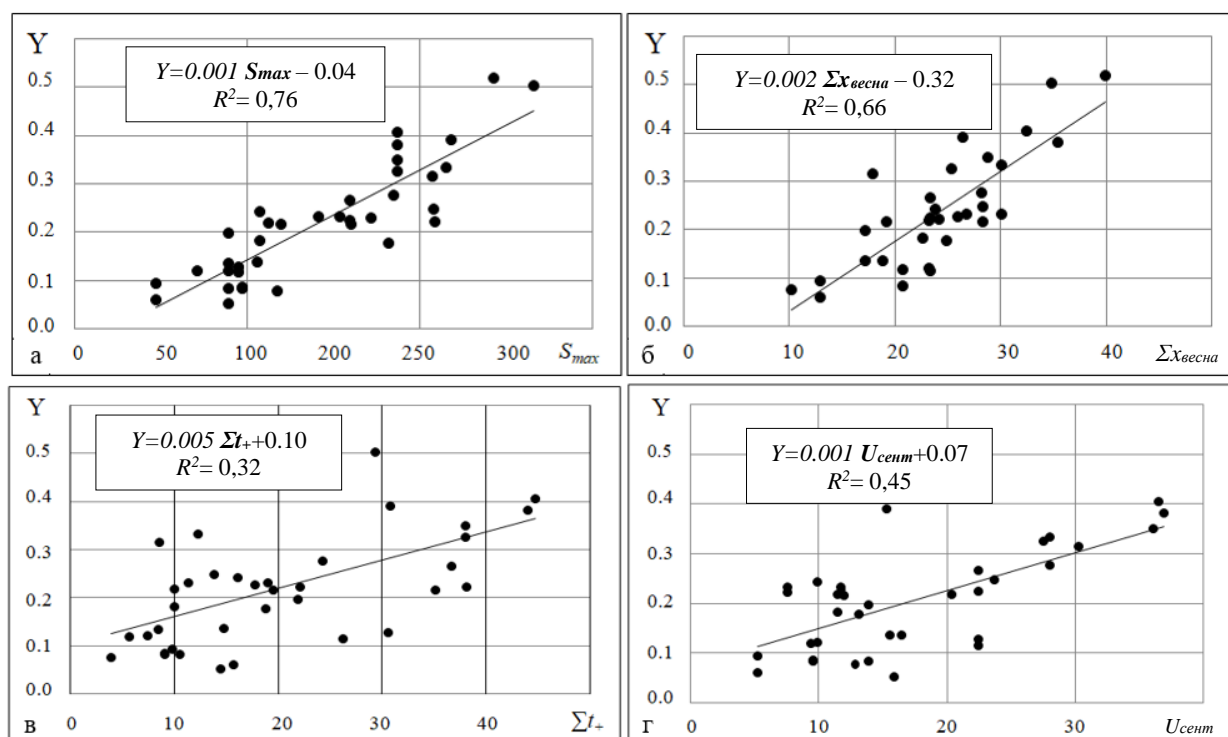


Рис. 4.2. Зависимости слоя стока за период весеннего половодья от основных факторов на примере многоводного 1979 г.: а) $Y = f(S_{max})$, б) $Y = f(\Sigma t_+)$, в) $Y = f(\Sigma x_{весна})$, г) $Y = f(U_{сент})$

Анализ полученных коэффициентов корреляции и зависимостей в многоводные годы показал, что определяющими факторами в формировании высокого весеннего половодья на реках водосбора в многоводные годы являются

максимальный снеговой запас и осадки, выпавшие в период половодья, что прослеживается за все выбранные годы (табл. 4.5). Чем больше запасы воды в снеге к началу снеготаяния, тем больше слой стока весеннего половодья. Осадки, выпавшие в этот период, способствуют увеличению стока рек в эту фазу водного режима (Калинин, Механошина, 2018, 2019, 2020; Механошина, 2018).

Таблица 4.5

Коэффициенты корреляции r по зависимостям от метеорологических факторов

Факторы	Многоводные годы													
	1965	1971	1978	1979	1984	1986	1990	1993	1994	2002	2007	2008	2017	2019
S_{max}	0,39	0,55	0,82	0,87	0,81	0,57	0,61	0,73	0,84	0,74	0,78	0,84	0,70	0,74
$\sum t_+$	0,44	0,36	0,23	0,57	0,40	0,05	0,48	0,12	0,49	0,46	0,39	0,51	0,30	0,28
$\sum x_{весна}$	0,61	0,64	0,63	0,82	0,47	0,56	0,75	0,61	0,71	0,65	0,72	0,70	0,69	0,65
$U_{сент}$	0,65	0,16	0,52	0,67	0,25	0,23	0,18	0,56	0,04	0,54	0,49	0,38	0,50	0,49

Примечание: серой заливкой выделены главные факторы формирования весеннего половодья.

Теснота зависимости $Y = f(U_{сент})$ значительно ниже. Это объясняется тем, что осеннее увлажнение оказывает косвенное влияние на величину слоя стока весеннего половодья – при большом осеннем увлажнении уменьшаются потери воды на инфильтрацию во время снеготаяния.

Зависимость $Y = f(\sum t_+)$ характеризуется самыми низкими коэффициентами корреляции, поскольку ход температуры воздуха также оказывает косвенное влияние на величину слоя стока весеннего половодья (табл. 4.5, рис. 4.2). Этот фактор в большей степени влияет на формирование максимума весеннего половодья: чем больше сумма накопленных положительных температур воздуха, тем интенсивнее проходит процесс снеготаяния, что приводит к быстрому подъему уровня воды.

Аналогичное исследование было выполнено для средней и маловодной группы лет (табл. 4.6, 4.7). Выявлено, что в маловодные годы, как и в многоводные годы, определяющими факторами в формировании высокого весеннего половодья на реках водосбора являются максимальный снеговой запас и осадки, выпавшие в период половодья, что прослеживается во все выбранные годы (табл. 4.7).

Таблица 4.6

Коэффициенты корреляции r по зависимостям для средней по водности группы лет

Факторы	Средние по водности годы									
	1968	1972	1981	2009	1983	2000	2003	2004	2006	2009
S_{max}	0,73	0,71	0,78	0,74	0,77	0,73	0,83	0,76	0,78	0,71
$\sum t_+$	0,25	0,27	0,08	0,11	0,22	0,67	0,60	0,68	0,27	0,35
$\sum x_{весна}$	0,02	0,56	0,07	0,21	0,15	0,32	0,32	0,12	0,17	0,49
$U_{сент}$	0,44	0,15	0,08	0,09	0,08	0,41	0,07	0,10	0,07	0,23

Примечание: серой заливкой выделены главные факторы формирования весеннего половодья.

Таблица 4.7

Коэффициенты корреляции r по зависимостям для маловодной группы лет

Факторы	Маловодные годы									
	1973	1975	1976	1977	1982	1988	2010	2011	2012	
S_{max}	0,81	0,79	0,70	0,64	0,68	0,80	0,88	0,71	0,82	
$\sum t_+$	0,76	0,67	0,78	0,63	0,68	0,61	0,49	0,53	0,48	
$\sum x_{весна}$	0,70	0,87	0,74	0,71	0,80	0,63	0,75	0,68	0,72	
$U_{сент}$	0,62	0,68	0,69	0,62	0,80	0,65	0,85	0,54	0,43	

Примечание: серой заливкой выделены главные факторы формирования весеннего половодья.

В средние по водности годы (табл. 4.6) снегозапас является главным и основным фактором формирования весеннего половодья на реках. Большая сумма положительных температур оказала большое влияние на интенсивное прохождение снеготаяния, короткий период подъема и быстрое наступление максимума весеннего половодья, о чем свидетельствует преобладающий вид 2-го типа гидрографа. Атмосферные осадки за период весеннего половодья не оказывают существенного влияния, поскольку являются незначительными и не способствуют увеличению стока рек в эту фазу водного режима в средние по водности годы.

4.3 О возможности комплексного учета основных факторов на формирование стока весеннего половодья

На следующем этапе выполнено исследование возможности комплексного учета всех основных факторов.

Поскольку рассмотренные факторы независимы друг от друга, а их влияние

на величину стока весеннего половодья прямо пропорционально, то для оценки их совокупного воздействия предложен параметр $K = S_{max} \cdot \sum x_{весна} \cdot U_{сент} \cdot \sum t_{+}$, который представляет собой произведение этих показателей. Размерность коэффициента $K - \text{°C} \cdot \text{мм}^3$, то есть сумма положительных температур воздуха от даты перехода через 0°C до даты начала интенсивного подъема на суммарный объем воды, сформировавшийся за период весеннего половодья; от таяния снежного покрова; осадков, выпавших за этот период, и повышенного поверхностного стока, обусловленного достаточным осенним увлажнением почвы, уменьшающим инфильтрацию талой воды в весенний период. Комплексное влияние факторов на величину весеннего стока будет тем сильнее, чем больше воздействие каждого из факторов.

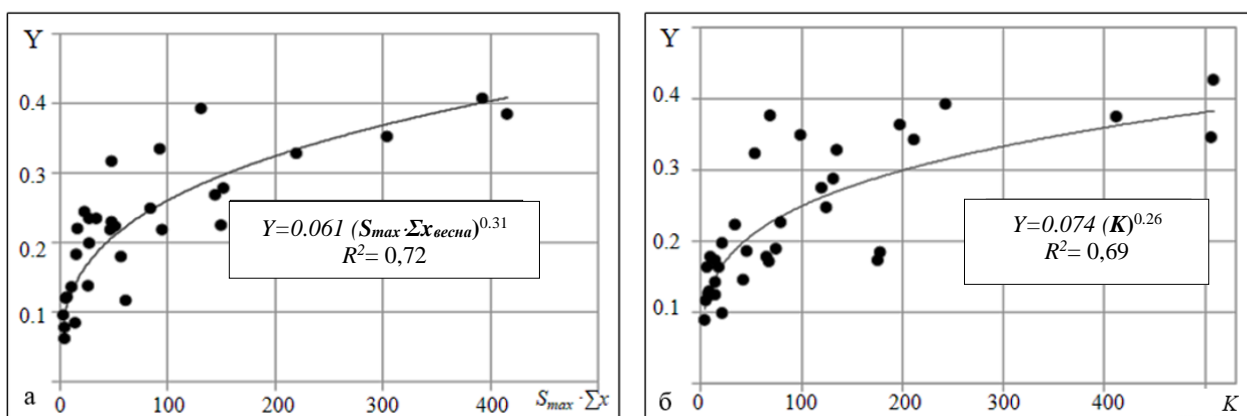


Рис. 4.3. Зависимости слоя стока за период весеннего половодья от основных факторов за многоводный 1979 г.: а) $Y = f(S_{max} \cdot \sum x_{весна})$, $Y = f(K)$

Оценка влияния двух главных факторов максимальных снегозапасов и осадков, выпавших в период половодья, на слой стока за многоводную группу лет показала, что эти зависимости $Y = f(S_{max} \cdot \sum x_{весна})$ (табл. 4.8) являются статистически значимыми и характеризуются самыми высокими коэффициентами корреляции ($r = 0,70 \div 0,86$).

Таблица 4.8

Коэффициенты корреляции r по зависимостям за многоводные годы

Факторы	Многоводные годы												
	1971	1978	1979	1984	1986	1990	1993	1994	2002	2007	2008	2017	2019
$S_{max} \cdot \sum x_{весна}$	0,70	0,79	0,86	0,70	0,65	0,76	0,85	0,85	0,76	0,82	0,79	0,73	0,76
$S_{max} \cdot \sum x_{весна} \cdot U_{сент}$	0,50	0,71	0,80	0,59	0,58	0,60	0,81	0,61	0,75	0,72	0,74	0,71	0,70
K	0,48	0,60	0,83	0,53	0,40	0,56	0,56	0,57	0,65	0,65	0,66	0,60	0,59

Примечание: серой заливкой выделены главные факторы формирования весеннего половодья.

При добавлении величины осеннего увлажнения $U_{сент}$ в исследуемую зависимость $Y = f(S_{max} \cdot \sum x_{весна} \cdot U_{сент})$ теснота связи незначительно увеличивается.

Зависимость вида $Y = S_{max} \cdot \sum x_{весна} \cdot U_{сент} \cdot \sum t_+$ является значимой, однако, увеличение количества переменных приводит к некоторому снижению тесноты (табл. 4.8, рис. 4.3) (Kalinin, Mekhanoshina, 2019).

В средние по водности годы наилучшие результаты получены от одного ранее выявленного главного фактора (табл. 4.9).

Таблица 4.9

Коэффициенты корреляции r по зависимостям для средних по водности лет

Факторы	Средние по водности годы									
	1968	1972	1981	2009	1983	2000	2003	2004	2006	2009
S_{max}	0,73	0,71	0,78	0,74	0,77	0,73	0,83	0,76	0,78	0,71
$S_{max} \cdot \sum x_{весна}$	0,38	0,64	0,43	0,48	0,46	0,53	0,58	0,44	0,48	0,60
K	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51

Примечание: серой заливкой выделены главные факторы формирования весеннего половодья.

Исследование комплексного воздействия всех факторов на формирование стока весеннего половодья в виде $K = S_{max} \cdot \sum x_{весна} \cdot U_{сент} \cdot \sum t_+$, в маловодные годы (табл. 4.10) подтвердило полученные результаты как и для многоводной группы лет и показало, что комплексный учет всех рассматриваемых характеристик не дает существенного увеличения тесноты связи, и наиболее высокие коэффициенты корреляции получены от двух главных факторов у зависимостей вида $Y = f(S_{max} \cdot \sum x_{весна})$.

Таблица 4.10

Коэффициенты корреляции r по зависимостям для маловодной группы лет

Факторы	Маловодные годы									
	1973	1975	1976	1977	1982	1988	2010	2011	2012	
$S_{max} \cdot \sum x_{весна}$	0,82	0,90	0,80	0,79	0,83	0,86	0,89	0,76	0,85	
$S_{max} \cdot \sum x_{весна} \cdot U_{сент}$	0,71	0,78	0,71	0,66	0,76	0,69	0,83	0,64	0,66	
K	0,72	0,75	0,73	0,65	0,74	0,67	0,74	0,62	0,61	

Примечание: серой заливкой выделены главные факторы формирования весеннего половодья.

Выводы:

Анализ характеристик весеннего половодья показал, что пик половодья приходится на апрель–май. Рост водности на горных водосборах из-за большего наклона поверхности происходит в среднем на 11 дней быстрее и интенсивнее, чем на равнинных. Продолжительность весеннего половодья в многоводные годы наблюдается в среднем на 3–4 дня раньше, чем в средние и в маловодные годы. Также в многоводные годы на реках наблюдается наибольшая продолжительность весеннего половодья (53 дня). Со снижением водности продолжительность половодья сокращается и в средние по водности и маловодные годы составляет 44–41 день.

Оценка влияния морфометрических характеристик водосбора на продолжительность весеннего половодья показала, что при использовании одного фактора для установления зависимостей с продолжительностью весеннего половодья наилучшая теснота связи получена с площадью водосбора. Парные коэффициенты корреляции (r) изменяются в пределах 0,61–0,90. Наибольшая теснота связи наблюдается у равнинных рек (0,76–0,90), для горных связь ниже (0,61–0,70). Все зависимости имеют положительные коэффициенты корреляции, то есть чем больше площадь водосбора реки, тем больше продолжительность и наоборот.

Анализ возможности комплексного учета всех исследуемых факторов в формирование продолжительности весеннего половодья в виде суммы $F+H_{cp}+I_{cp}+I_{zl}$ показал, что это не дает существенного увеличения тесноты связи. Наиболее высокие коэффициенты множественной регрессии для равнинных рек получены от комбинации факторов $(F+I_{cp}+I_{zl})$, эти регрессионные модели имеют «очень хорошее» качество ($NSE=0,91-0,92$). Средняя ошибка расчета по модулю составила 2,0–3,1 дня. У горных рек наилучшая комбинация получена от суммы факторов $F+I_{cp}+I_{zl}$. Регрессионные модели соответствуют «хорошему» и «удовлетворительному» качеству ($NSE=0,64-0,76$). Средняя ошибка расчета по модулю составила 4,0 дня.

Основными факторами формирования стока весеннего половодья на реках водосбора являются максимальный запас воды в снеге перед началом снеготаяния и осадки в период весеннего половодья. Величина осеннего увлажнения и сумма среднесуточных положительных температур воздуха от

даты перехода температуры воздуха через 0°C к положительным значениям до даты начала интенсивного подъема уровня воды оказывают косвенное влияние.

Анализ возможности комплексного учета всех исследуемых факторов на формирование стока весеннего половодья в виде $K = S_{max} \cdot \sum x_{весна} \cdot U_{сент} \cdot \sum t +$ показал, что это не дает существенного увеличения тесноты связи. Наиболее высокие коэффициенты корреляции получены у зависимостей вида $Y = f(S_{max} \cdot \sum x_{весна})$.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ЗАБЛАГОВРЕМЕННОГО РАСЧЕТА ВОДНОСТИ ГОДА НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИТОКА ВОДЫ ЗА ВЕСЕННЕЕ ПОЛОВОДЬЕ

Ежегодно, при подготовке к началу весеннего сезона для планирования комплекса мер по проведению превентивных мероприятий и мониторингу паводковой обстановки, уполномоченным органам необходимы своевременные и качественные расчеты определения главной фазы водного режима и водности года в целом. Использование таких расчетов позволяет избежать возникновения наводнений, чреватых серьезными разрушениями и убытками для населения и с большим экономически обоснованным эффектом осуществлять рациональное использование водных ресурсов.

В настоящее время для определения водности года и стока за период весеннего половодья упор, в основном, ставится на применение разнообразных моделей формирования речного стока, основанных на расчетах снеготаяния и поступления воды с водосбора в речную сеть (Кучмент, Гельфан 2000, 2004, 2010; Мотовилов, Гельфан, 2018; Яковченко, 2006; Бураков, Иванова, 2010; Пьянков, Шихов, 2014, 2017, 2019; Симонов и др., 2016; Калинин, Шайдулина, 2022). Несмотря на точность и перспективность математических моделей, по сравнению с традиционными методами, использование их затруднено в связи с чрезмерной сложностью применения для расчета стока. В настоящее время наиболее применимы классические подходы, основанные на упрощенном представлении процессов формирования стока, зарекомендовавшие себя как надежные методы расчетов.

Также следует отметить, что для исследуемой территории существуют методики долгосрочного прогноза притока воды, которые были разработаны в 60-70 х годах XX века только для Камского водохранилища. Так, в 1967 г. Н.Д. Лебедевой разработана методика долгосрочного прогноза объёма весеннего притока к Камскому водохранилищу с заблаговременностью до 25 суток. Данная методика не была внедрена в оперативную практику для выпуска гидрологических прогнозов. Выпуск долгосрочных прогнозов притока воды в Камское водохранилище осуществляет ФГБУ «Уральское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» по методике Государственного гидрологического института, разработанной в 1974 г. В основу

этой методики легли исследования Е.И. Соколова (1940), Т.Т. Макаровой (1955) и Н.Д. Лебедевой (1967).

В Пермский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ПЦГМС) выпускает только краткосрочные прогнозы (заблаговременность до 6 сут) притока воды к Камской ГЭС на основе методики Н.Д. Лебедевой (1967), в основу которой входит учет максимальных снегозапасов, осадков и характеристика увлажнённости бассейна. Слой стока рассчитывается по схеме с применением температурных коэффициентов, для условий рек водосбора Камского водохранилища.

Современных методик расчета притока воды за период весеннего половодья и определения водности года в целом для водосбора Верхней и Средней Камы нет. Поэтому достаточно актуальным является разработка алгоритма расчета стока весеннего половодья и возможности определения водности года в целом на основе изучения ВГРС и главной фазы водного режима, позволяющая повысить качество расчетов и рассматривать проблему комплексно, во взаимосвязи её отдельных частей.

5.1. Характеристика среднемесячного и годового притока воды

Приток воды в водохранилище в период главной фазы водного режима, считается одной из основных характеристик, по которой можно оценить водность предстоящего года в целом для водосбора. На водосборе рек Верхней и Средней Камы расположены два водохранилища: Камское (первое в каскаде) и Воткинское (второе в каскаде). Основной приток воды в Воткинское водохранилище на 95% зависит от сбросов с Камского гидроузла. Приток Воткинского гидроузла определяется сбросным расходом Камского с учётом «времени добегания» водного потока, которое принято равным одним суткам. Таким образом, для исследуемой территории наибольший интерес представляет разработка алгоритма расчета притока воды для водосбора Камского водохранилища.

Разработка алгоритма расчета притока воды в водохранилища является главным условием для разработки графика оптимального режима работы ГЭС, особенно в период весеннего половодья, так как расчеты притока воды, определение отметок сработки, эффективное управление крупными водохозяйственными системами являются гарантией обеспечения безопасной

работы гидротехнических сооружений.

Камское водохранилище расположено на северо-востоке европейской части России. Практически полностью его водосбор расположен на территории Пермского края. Площадь водного зеркала водохранилища при НПУ составляет 1 915 км², объём водной массы – 12,2 км³, длина 250 км с севера на юг, максимальная глубина водохранилища составляет 30 м, средняя ширина – 5,5 км, с максимальным значением 14 км. Площадь водосбора Камского водохранилища составляет 168000 км² (ПИВР, 2016).

Для составления общей характеристики среднемесячного и годового притока воды в Камское водохранилище использованы материалы расчетов Пермского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ПЦГМС) по среднемесячному притоку воды в водохранилище Камской ГЭС за период с 1954 по 2022 годы. Исследуемая характеристика притока была рассчитана ПЦГМС на основе фактических значений среднесуточных расходов воды в замыкающих створах рек, которые впадают в водохранилище, а также с учетом боковой приточности с неучтенных территорий.

Для анализа использованы величины объема притока, рассчитанные по месяцам (W , км³/месяц). Также рассчитан сезонный сток (км³/сезон) для трех периодов: зимняя сработка (ноябрь-март), весеннее наполнение (апрель-июнь), летне-осенняя стабилизация (июль-октябрь). Границы сезонов были определены на основе гидрографов притока и дат начала и окончания интенсивного притока воды в водохранилище. Годовой приток (км³/год) рассчитан как сумма объемов притока за 12 месяцев. Для оценки изменчивости величин притока воды для каждого месяца были рассчитаны коэффициенты вариации (C_v) (Микова, Механошина и др., 2025).

На основе ранее выявленных изменений сезонного стока был выполнен анализ многолетнего изменения притока воды. Выполненные исследования показали, что *в зимние месяцы* (ноябрь, декабрь, январь, февраль, март) приток воды к Камскому водохранилищу минимален и изменяется в среднем от 1,115 до 3,100 км³/мес (табл. 5.1). Доля притока в зимние месяцы невелика – изменяется от 1,9 до 5,4% от годовой величины. Объем стока по месяцам в этот сезон в среднем достигает 1,735 км³/мес. Наибольший среднемесячный приток в течение зимних месяцев зафиксирован в ноябре и составил 3,100 км³/мес. Возможно, это связано с тем, что в ноябре ещё поступает некоторое количество воды от дождевых паводков из отдалённых частей водосбора. В последующие месяцы приток постепенно уменьшается и в феврале достигает минимальных значений 1,115 км³/мес (рис. 5.1).

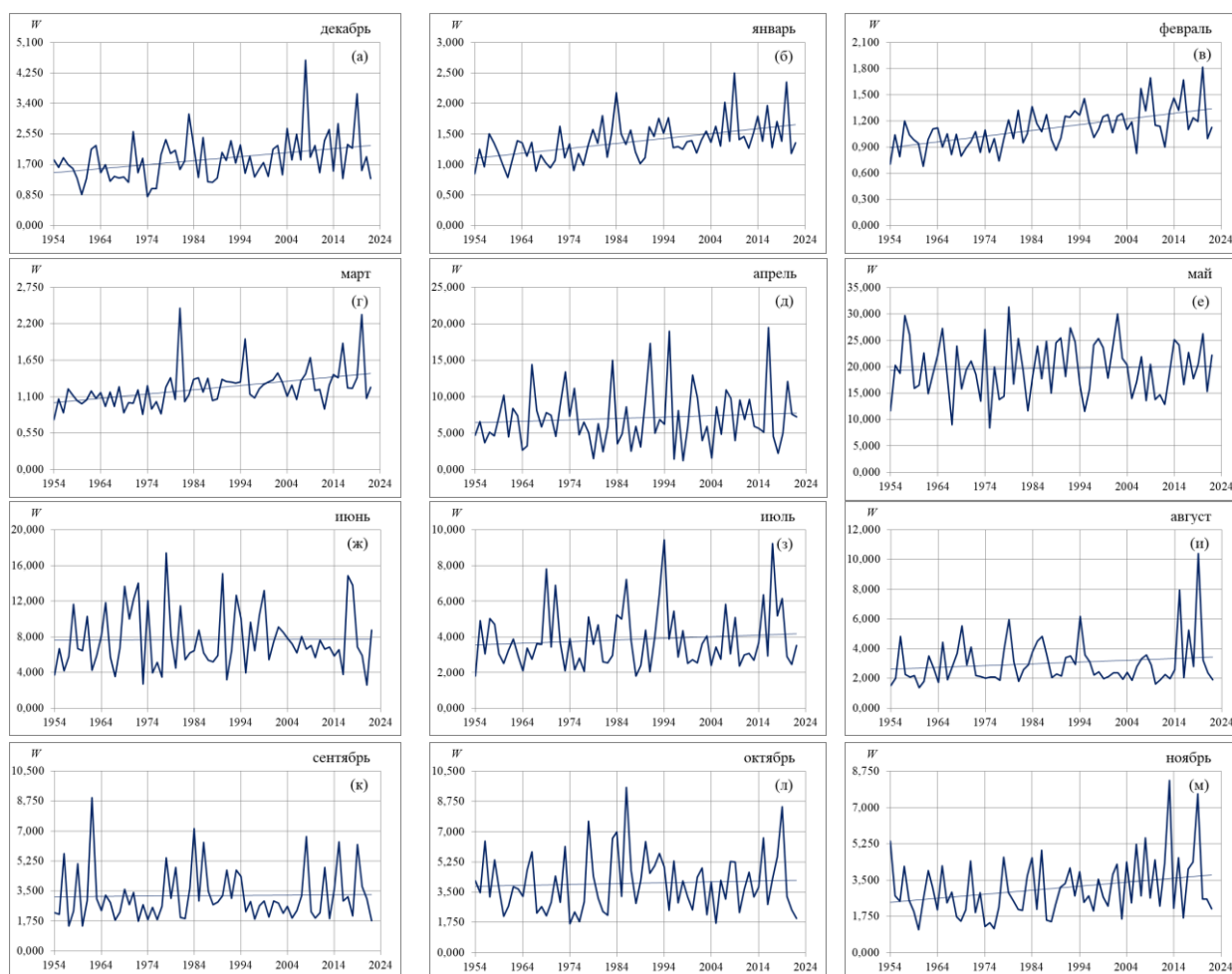


Рис. 5.1. Многолетнее (1954-2022 гг.) изменение объема месячного притока (W , км³/мес) воды к Камскому водохранилищу

Наибольший приток достигал 1,819-8,309 км³/мес, что в 1,6-2,7 раза выше среднего многолетних значений в отдельные годы (1981, 2008, 2009, 2020 гг.). Наименьший приток составлял 0,682-1,117 км³/мес, что в 1,6-2,8 раза меньше среднего значения и наблюдался в 1954, 1961, 1974 гг. Изменчивость притока в зимние месяцы наименьшая $C_v=0,21-0,35$ из-за устойчивого грунтового питания и отсутствия поверхностного притока (Микова, Механошина и др., 2026).

В период *весеннего наполнения* (апрель, май, июнь) приток воды в водохранилище максимальный и находится в диапазоне от 7,071 до 19,723 км³/мес. (табл. 5.1). В данный период в Камское водохранилище поступает в среднем 60% годового притока. Начиная с апреля доля притока существенно увеличивается (12,3% от годового) по сравнению с притоком за март (2,2% от годового). В мае приток продолжает расти и становится наибольшим (34,4% от годового). Далее в июне доля притока снижается (до 13,4%) более чем в 2 раза по сравнению с маем (рис. 5.1), но его доля остается существенной. Такое уменьшение притока связано с завершением добега талой воды от самых удаленных частей водосбора до Камского

водохранилища. Наибольшие значения максимального притока в весенний период изменялись в пределах 17,392–31,337 км³/мес и наблюдались в 1978, 1979 и 2016 гг. В 1978 г. и 1979 г. были одними из самых холодных на исследуемой территории, что привело к существенному промерзанию почвы и долгому ее оттаиванию весной. Вследствие этого, талые воды во время снеготаяния слабо просачивались в почву и, в основном, стекали по поверхности водосбора. Это привело к существенному сокращению потерь стока на впитывание в почву и увеличению поверхностного стекания в весенние месяцы. Наименьший приток в весенние месяцы был в 2-6 раза ниже среднемноголетнего притока и составил 1,216-8,357 км³/мес (рис. 5.1).

Таблица 5.1

Средний, максимальный и минимальный приток воды (км³/мес) к Камскому водохранилищу за период 1954–2022 гг.

Показатель	Средний		C _v	Max	Год	Min	Год
	км ³ /мес	%					
Январь	1,379	2,4	0,24	2,504	2009	0,787	1961
Февраль	1,115	1,9	0,21	1,819	2020	0,682	1961
Март	1,232	2,2	0,24	2,440	1981	0,753	1954
Апрель	7,071	12,3	0,56	19,459	2016	1,216	1998
Май	19,723	34,4	0,26	31,337	1979	8,357	1975
Июнь	7,680	13,4	0,44	17,392	1978	2,600	2021
Июль	3,859	6,7	0,43	9,428	1994	1,789	1954
Август	3,024	5,3	0,51	10,390	2019	1,385	1960
Сентябрь	3,225	5,6	0,47	8,942	1962	1,439	1960
Октябрь	4,033	7,0	0,42	9,562	1986	1,674	1974
Ноябрь	3,100	5,4	0,46	8,309	2013	1,117	1960
Декабрь	1,850	3,2	0,35	4,612	2008	0,804	1974
За год	57,290	100	0,16	78,883	2019	37,704	1975

Небольшой приток в весенний период был в 1975 г. из-за малых величин снегозапаса, а 1998 г. из-за возврата холодов весной и более растянутого половодья, в результате которого были большие потери на впитывание. Изменчивость притока в период наполнения наибольшая $C_v=0,26-0,56$, так как доля поверхностного питания может существенно меняться от месяца к месяцу (Механошина, Микова, 2026).

В период *летне-осенней стабилизации* (июль–октябрь) приток воды к Камскому водохранилищу стабилен и изменяется в среднем от 3,024 км³/мес до 4,033

км³/мес. Доля притока воды в эти месяцы изменяется от 5,3% до 7,0% от годового. В период летне-осенней стабилизации приток продолжает сокращаться, средний объем притока за сезон летне-осенней стабилизации составил 3,535 км³/мес. Максимальный приток составил 10,390 км³/мес в 2019 г. Минимальный приток был более чем в 7 раз ниже максимального притока (1,385 км³/мес). Вместе с этим, величина притока изменяется в зависимости от количества дождевых осадков в данный период. Изменчивость притока в данные месяцы высокая $C_v=0,42-0,51$ (табл. 5.1).

Отдельно следует рассмотреть вопрос *о многолетнем изменении среднемесячного и годового притока воды*. Анализ графиков многолетнего (1954-2022 гг.) изменения объемов месячного притока воды к Камскому водохранилищу (рис. 5.1) показал, что в отдельные месяцы (ноябрь-апрель, июль, август, октябрь) прослеживается видимый тренд на увеличение. Величины изменения объема притока воды в Камское водохранилище по месяцам приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Изменение объема притока воды в Камское водохранилище за зимние месяцы

Месяц	Объем притока, км ³ /мес		ΔW		Месяц	Объем притока, км ³ /мес		ΔW	
	1954-1977	1978-2022	км ³ /мес	%		1954-1977	1978-2022	км ³ /мес	%
январь	1,144	1,504	+0,360	+31	июль	3,555	4,021	+0,466	+13
февраль	0,943	1,208	+0,265	+28	август	2,657	3,220	+0,563	+21
март	1,033	1,338	+0,305	+30	сентябрь	2,948	3,373	+0,425	+14
апрель	7,037	7,088	+0,051	+1	октябрь	3,539	4,296	+0,757	+21
май	18,891	20,166	+1,276	+7	ноябрь	2,600	3,367	+0,767	+30
июнь	7,451	7,803	+0,352	+5	декабрь	1,537	2,017	+0,480	+31
Год						53,334	59,400	+6,067	+11

Примечание: $W_{1954-1977}$ и $W_{1978-2022}$ – объем среднего притока воды за 1954-1977 гг. 1978-2022 гг., км³/мес; ΔW – изменение объем среднего притока воды за период 1978-2022 гг. по сравнению с периодом 1954-1977 гг.; **жирным курсивом** выделены статистически значимые изменения притока.

Объем среднего притока воды за период современных климатических изменений (1978-2022 г.) по сравнению с периодом стационарного климата (1954-1977 гг.) увеличился во все месяцы. Менее всего изменился объем притока в период весеннего наполнения с апреля по июнь (1-7%), где из-за существенных величин притока прирост на +1,276 км³/мес привел к повышению всего на 7%. С июня по октябрь приток увеличивался уже на 13-21%, что составляет средний прирост на

0,106-0,189 км³/мес за каждое десятилетие. Наибольшие изменения произошли в зимние месяцы (ноябрь-март) – объем среднего притока воды за период современных климатических изменений (1978-2022 г.) увеличился на 28-31%. Данные изменения оказались статистически значимы ($p > 0,05$) (табл. 5.2) (Микова, Механошина и др., 2026).

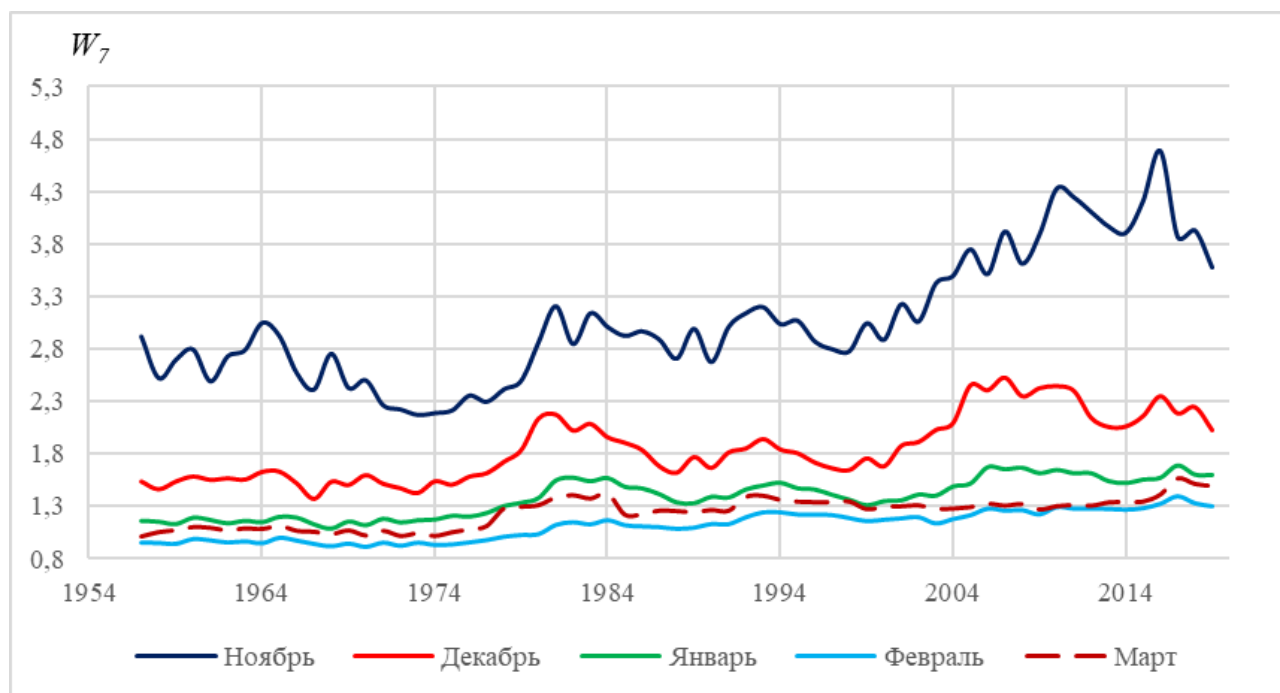


Рис. 5.2. Сглаженные по 7-леткам объемы притока воды (W_7 , км³/мес) в Камское водохранилище за зимние месяцы

Определение года начала значимого увеличения притока в зимние месяцы выполнено по сглаженным по 7-леткам кривым объемов притока (рис. 5.2). Результаты показали, что приток воды существенно увеличивается в ноябре, начиная с 1979 г., в декабре с 1977 г., в январе с 1976 г., в феврале с 1977 г. и в марте с 1976 г. В среднем начало периода существенного увеличения зимнего притока в Камское водохранилище приходится на 1978 г. Схожие результаты получены в исследовании других авторов (Калинин и др., 2023), где в результате анализа многолетней изменчивости годового стока семи рек Верхней и Средней Камы выявлено, что с 1978 г. наблюдается увеличение годового стока рек. Таким образом, в нашем исследовании период 1954-1977 гг. принят как период стационарного климата, а период 1978-2022 г. как период современных климатических изменений.

Сезонные изменения притока воды в Камском водохранилище рассчитаны за два периода: 1954-1977 гг. – период стационарных климатических условий;

1978-2022 гг. – период современных климатических изменений. Среднегодовой объем притока воды в Камское водохранилище за весь период 1954-2022 гг. составил 57,290 км³. При этом после 1978 г. наблюдается увеличение притока в водохранилища во все сезоны на 5-30%. В период весеннего наполнения (апрель-июнь) приток воды вырос +1,679 км³/сезон (+5%). В период летне-осенней стабилизации (июль-октябрь) приток воды увеличился на +2,212 км³/сезон, что соответствует увеличению притока на 17% по сравнению с периодом 1954-1977 гг. Значительно увеличился приток в период зимней сработки (ноябрь-март). Поскольку величины притока в этот сезон небольшие (табл. 5.3), то увеличение на +2,176 км³/сезон привело к росту притока на 30% по сравнению с 1954-1977 гг. Данные изменения зимнего притока оказались статистически значимыми (Микова, Механошина и др., 2026).

Таблица 5.3

Среднее значение сезонного притока воды за разные временные периоды и изменение объема среднего притока воды к Камскому водохранилищу

Сезон	$W_{1954-1977}$		$W_{1978-2022}$		ΔW	
	км ³ /сезон	%	км ³ /сезон	%	км ³ /сезон	%
Зимняя сработка	7,257	13	9,433	16	+2,176	+30
Весеннее наполнение	33,38	63	35,06	59	+1,679	+5
Летне-осенняя стабилизация	12,70	24	14,91	25	+2,212	+17
Приток за год	53,33	100	59,40	100	+6,067	+11

Примечание: $W_{1954-1977}$, $W_{1978-2022}$ – объем среднего притока воды за 1954-1977 гг. и 1978-2022 гг., км³/сезон; ΔW – изменение объема среднего притока воды за период 1978-2022 гг. по сравнению с периодом 1954-1977 гг.; **жирным курсивом** выделены статистически значимые изменения притока.

До начала выраженных климатических изменений за период наблюдений с 1954 по 1977 гг. распределение сезонного стока в % было следующим: зимняя сработка – 13%, весеннее наполнение – 63%, летне-осенняя стабилизация – 24%. После смены цикла водности (1978-2022 гг.) произошло увеличение стока по сезонам и перераспределение стока внутри сезонов, которое стало соответствовать следующему соотношению в % от годового: зимняя сработка – 16% (+3%), весеннее наполнение – 59% (-4%), летне-осенняя стабилизация – 25% (+1%).

Далее выполнена попытка оценить, насколько климатические изменения оказывают влияние на значения притока воды (рис. 5.3). Для этого построены разностно-интегральные кривые, которые позволяют выявить долговременные

периоды (фазы), в течение которых существенно чаще встречаются значения характеристики ниже или выше ее среднемноголетнего значения.

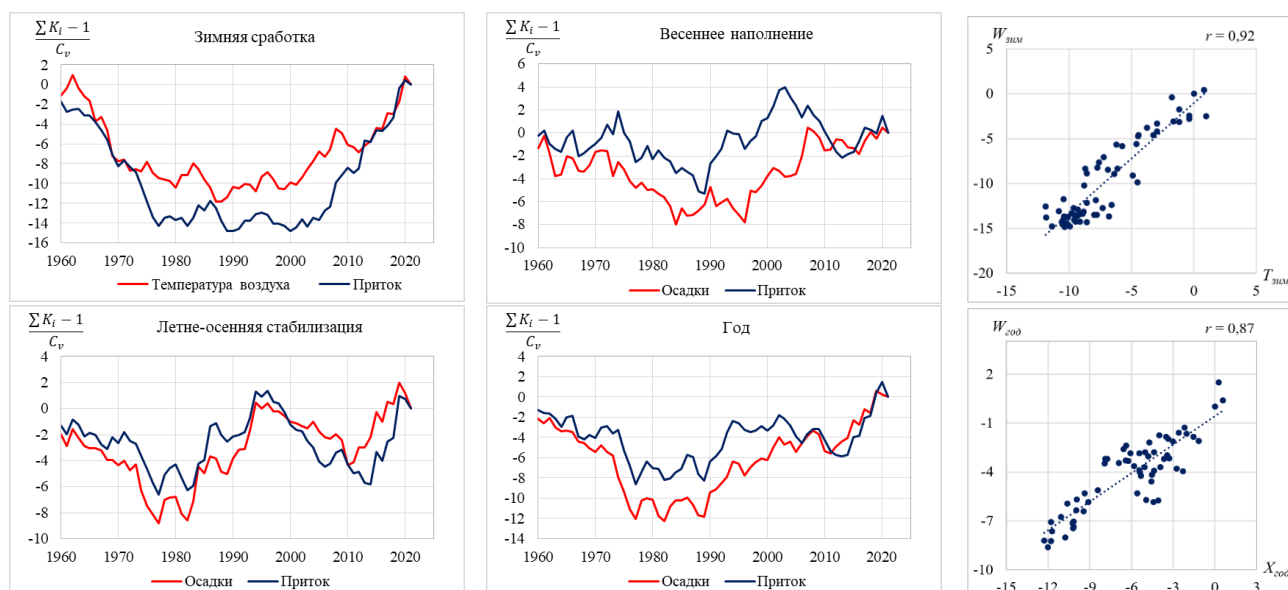


Рис. 5.3. Совмещенные разностно-интегральные кривые притока воды и климатических характеристик за период 1960-2021 гг. и зависимости циклов: (а) притока воды за период зимней сработки ($W_{зим}$) от средней температуры воздуха в этот период ($T_{зим}$) (б) годового притока воды ($W_{год}$) от годовой суммы осадков ($X_{год}$)

Для определения причин изменения притока воды в Камское водохранилище по сезонам выполнен совместный анализ цикличности притока воды, температуры воздуха и осадков. Выявлено, что объем притока за период зимней сработки имеет синхронные циклы со средней температурой воздуха. При этом незначительное понижение средней температуры в этот период приводит к более существенному снижению стока. Скоррелированность циклов составляет $r=0,92$. Для периодов весеннего наполнения и летне-осенней стабилизации выявлена лучшая скоррелированность циклов притока с осадками. В весенний период скоррелированность циклов невысокая $r=0,48$, так как на приток также оказывают влияние другие факторы, существенно меняющиеся год от года (температура воздуха, дружность весны, предшествующая увлажненность бассейна, глубина промерзания почвы и т.д.). В период летне-осенней стабилизации скоррелированность циклов высокая $r=0,73$ и, в основном, зависит от количества осадков в этот период. Здесь при увеличении осадков наблюдается рост притока воды и наоборот. Циклы годового притока лучше скоррелированы с осадками ($r=0,87$), чем с температурой воздуха ($r=0,57$) несмотря на ее существенное изменение.

Многолетние изменения годового притока. Результаты показали, что за

период 1954-2022 гг. годовой приток изменялся более чем в два раза от 37,704 км³ (1975 г.) до 78,883 км³ (2019 г.). Средняя величина притока за рассматриваемый период составила 57,290 км³. Изменчивость годового притока небольшая $C_v=0,16$.

За период 1954-2022 гг. наблюдается тенденция к росту притока воды в Камское водохранилище за 1954–2022 гг. Оценка значимости тренда показала, что тренд статистически значим ($p>0,05$). Увеличение притока в водохранилища во все сезоны в период 1978-2022 гг. привело к увеличению суммы годового притока воды в Камское водохранилище на 11% (табл. 5.3) (Микова, Механошина и др., 2025).

5.2. Разработка алгоритма расчета притока в период весеннего половодья

Приток в Камское водохранилище ($W_{Кв}$) определялся по фактическим данным за период 1968–2020 гг., рассчитанным по суточным объемам притока воды 8 основных замыкающих створов (р. Кама – Бондюг; р. Вишера – Рябинино; р. Яйва – Усть-Игум; р. Иньва – Слудка; р. Косьва – Останино (Перемское); р. Обва – Карагай; р. Чусовая – Лямино; р. Сылва – Подкаменное (Сылвенск) и притока с неосвещенной территории (рис. 5.4):

$$W_{Квт} = W_{Яt} + W_{Иt} + W_{Кот} + W_{Ot} + W_{Чt} + W_{Сt} + W_{Каt-\tau} + W_{Вt-\tau} + \Delta W_t \quad (5.1)$$

где $W_{Я}$ – приток воды на р. Яйва - Усть-Игум, м³/с; $W_{И}$ – приток воды на р. Иньва-Слудка, м³/с; $W_{Ко}$ – приток воды на р.Косьва-Перемское, м³/с; $W_{О}$ – приток воды на р.Обва-Карагай, м³/с; $W_{Ч}$ – приток воды на р.Чусовая-Лямино, м³/с; $W_{С}$ – приток воды на р.Сылва-Сылвенск, м³/с; $W_{Ка}$ – приток воды на р. Кама-Бондюг, м³/с; $W_{В}$ – приток воды на р.Вишера-Рябинино, м³/с; ΔW_t – приток с неосвещенной территории; t – дата расчета; τ – время добегания, сут.

Приток с неосвещенной территории (ΔW_t) представляет собой величину притока с площади водосбора непокрытой сетью гидрологических постов. Рассчитывался умножением объема притока в замыкающем створе реки на площадной коэффициент (табл. 5.4), то есть на величину площади водосбора ниже замыкающего створа.

$$\Delta W_t = \Delta W_{Яt} + \Delta W_{Иt} + \Delta W_{Кt} + \Delta W_{Ot} + \Delta W_{Чt} + \Delta W_{Сt} \quad (5.2)$$

где $\Delta W_{Я}$ – р. Яйва, м³/с; $\Delta W_{И}$ – р. Иньва, м³/с; $\Delta W_{К}$ – р.Косьва, м³/с; $\Delta W_{О}$ – р.Обва, м³/с; $\Delta W_{Ч}$ – р.Чусовая, м³/с; $\Delta W_{С}$ – р.Сылва, м³/с.

Таблица 5.4

Площадные коэффициенты для
основных притоков Камского
водохранилища

Река	Площадной коэффициент
Яйва	0,51
Иньва	1,69
Косьва	0,45
Обва	0,56
Чусовая	0,13
Сылва	0,28

Для разработки алгоритма расчета притока воды в Камское водохранилище были собраны исходные данные. Объемы стока на 8 частных водосборах за период весеннего половодья были рассчитаны по комплексным графикам, включающим гидрограф для каждого гидрологического поста.

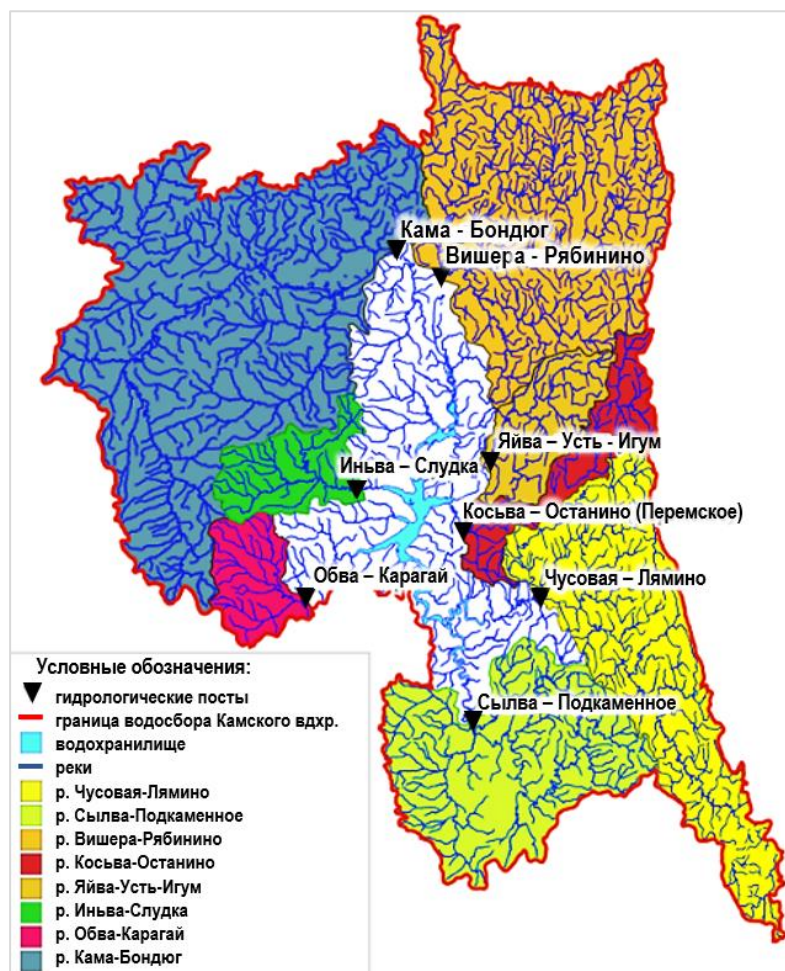


Рис. 5.4. Расположение замыкающих створов

Следует отметить, что гидрологические ряды на реках имеют разную продолжительность и наблюдается несовпадение их начал. Также в 60-х XX в. произошла смена в подходах к измерению метеорологических параметров, а надежные данные по снегозапасам для всего водосбора Камского водохранилища имеются только с 1968 г. Таким образом, для разработки алгоритма расчета была сформирована исходная база данных, охватывающая период с 1968 по 2010 гг. (43 года) и содержащая климатические и гидрологические показатели. Период с 2011 по 2022 гг. (11 лет) был выбран в качестве независимого материала для верификации методики расчета.

Фактические данные за период 1968-2010 гг. прошли проверку на однородность и стационарность (уровень значимости 5%), являются репрезентативным и включают полные циклы водности, относительная среднеквадратическая погрешность составляет менее 10% (рис.5.5).

г/п Кама-Бондюг



г/п Косьва-Останино (Перемское)



г/п Вишера-Рябинино



г/п Обва-Карагай



г/п Яйва-Усть-Игум



г/п Чусовая-Лямино



г/п Иньва-Слудка



г/п Сылва-Подкаменное (Сылвенск)



Рис. 5.5. Проверка однородности данных по 8 частным водосборам

Для разработки алгоритма расчета притока были проанализированы зависимости, где исследуемой характеристикой выступал объем стока W (млн куб. км) за период весеннего половодья, а в качестве основных факторов (предикторов) использованы следующие показатели:

- максимальный запас воды в снеге S_{max} перед началом снеготаяния, мм слоя воды (определялся по данным снегомерных съемок);

- сумма среднесуточных положительных температур воздуха $\sum t_+$ от даты перехода температуры воздуха через 0°C к положительным значениям до даты начала интенсивного подъема уровня воды, $^\circ\text{C}$;

- сумма осадков за период весеннего половодья $\sum x_{весна}$, мм (определялась с учетом добегаания их до замыкающего створа);

- осеннее увлажнение U , мм (принималась величина суммы осадков до устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C к отрицательным значениям). Величина суммы осадков рассчитывалась как от 1 сентября ($U_{сент}$, мм), так и от 1 октября ($U_{окт}$, мм);

- дата начала весеннего половодья $D_{нач}$, определялась по гидрографу как дата, с которой начинается стабильное и интенсивное увеличение расходов воды, устанавливается по точке перегиба на кривой графика расходов воды (без учёта мелких её неровностей);

- расход воды на дату начала весеннего половодья $Q_{нач}$, $\text{м}^3/\text{с}$.

В таблице 5.5 показано, данные каких метеостанций и гидрологических постов были использованы для расчета метеорологических характеристик.

Таблица 5.5

Метеостанции (м/с) и гидрологические посты (г/п), используемые для определения характеристик на частных водосборах исследуемых рек

№ п/п	Река-пост	S_{max}	$\sum t_+$, $\sum x_{весна}$, $U_{сент}$, $U_{окт}$
1	Кама-Бондюг	г/п Бондюг	м/с Гайны, м/с Чердынь
2	Вишера-Рябинино	г/п Рябинино	м/с Чердынь
3	Яйва-Усть-Игум	г/п Усть-Игум	м/с Губаха, м/с Березники
4	Иньва-Слудка	г/п Слудка	м/с Кудымкар
5	Косьва-Останино (Перемское)	г/п Перемское	м/с Губаха, м/с Добрянка
6	Обва-Карагай	г/п Карагай	м/с Верещагино
7	Чусовая-Лямино	м/с Лысьва	м/с Лысьва
8	Сылва-Подкаменное (Сылвенск)	м/с Кунгур	м/с Кунгур

Все величины предикторов были рассчитаны для восьми частных бассейнов, которые формируют приток в Камское водохранилище.

Далее выполнена оценка степени влияния каждого фактора на рассчитываемую величину, для этого были построены и проанализированы модели

множественной линейной регрессии объема стока воды W (млн куб. км) от основных факторов.

Перед разработкой регрессионной модели была выполнена оценка рядов на коллинеарность (взаимозависимость), которая нарушает условие независимости используемых факторов и приводит к дублированию факторами друг друга. Принято, что факторы коллинеарны, в случае если коэффициент корреляции между ними по модулю превышает 0,70. Для этого были построены матрицы корреляций между факторами. В результате выявлено, что сумма осадков от 1 сентября ($U_{сент}$, мм) и от 1 октября ($U_{окт}$, мм) являются коллинеарными, при этом у остальных факторов наличие связи не выявлено. Поэтому при разработке регрессионной модели сумма осадков от 1 сентября ($U_{сент}$, мм) и от 1 октября ($U_{окт}$, мм) вместе не использованы.

В результате были составлены регрессионные модели объема стока весеннего половодья с каждым из рассматриваемых факторов, и выполнена оценка тесноты связи по коэффициенту корреляции (R) как для одного фактора, так и в комплексном сочетании от двух, трех и четырех факторов.

Анализ парных корреляций. При построении зависимостей объема стока воды (W) от различных комбинаций факторов, снегозапасы (S_{max}) учитывались в каждой комбинации (табл. 5.6). Для моделей от одного фактора в таблице 5.6 приведен коэффициент парной корреляции; для моделей от двух, трех и четырех факторов рассчитан коэффициент множественной линейной регрессии.

При исследовании совместного влияния двух факторов выявлено, что наилучший результат дает совместное использование снегозапасов и осадков за весенний период ($S_{max} + \sum x_{весна}$), которые способствуют увеличению стока рек в эту фазу водного режима. Коэффициент множественной регрессии становится существенно выше ($R = 0,63-0,82$).

Следует отметить, что, осадки за период половодья однозначно способствуют увеличению стока рек в эту фазу водного режима, учет которых может существенно улучшить расчет методики. Определить эту величину заблаговременно на дату выполнения расчета (31 марта) невозможно. Использование же средних значений осадков, либо прогноза увлажненности территории может внести в расчет существенную долю неопределённости. При добавлении в модель третьего фактора теснота связей значительно не увеличивалась (табл. 5.6).

Таблица 5.6

Оценка тесноты связей регрессионных моделей для расчета объема стока воды (W , млн. км³) за период весеннего половодья

Фактор	Кама-Бондог	Вишера-Рябинино	Яйва-Усть-Игум	Иньва-Слудка	Косьва-Останино (Перемское)	Обва-Карагай	Чусовая-Лямино	Сылва-Подкаменное (Сылвенск)
Один фактор								
S	0,68	0,53	0,72	0,54	0,49	0,55	0,64	0,60
$Q_{нач}$	0,22	0,01	0,01	0,34	0,43	0,60	0,20	0,67
$D_{нач}$	0,00	0,21	0,08	0,45	0,04	0,04	0,02	0,18
ΣT^+	0,08	0,15	0,30	0,13	0,10	0,21	0,06	0,09
$X_{сент}$	0,13	0,18	0,05	0,13	0,10	0,19	0,25	0,18
$X_{окт}$	0,05	0,08	0,03	0,10	0,00	0,03	0,31	0,12
$X_{весна}$	0,36	0,04	0,62	0,04	0,66	0,42	0,58	0,23
Два фактора								
$S+Q_{нач}$	0,69	0,53	0,72	0,57	0,58	0,70	0,65	0,75
$S+D_{нач}$	0,69	0,58	0,73	0,69	0,50	0,57	0,65	0,60
$S+\Sigma T$	0,69	0,47	0,73	0,53	0,54	0,51	0,62	0,58
$S+X_{сент}$	0,70	0,59	0,74	0,51	0,56	0,55	0,69	0,61
$S+X_{окт}$	0,69	0,59	0,74	0,55	0,53	0,55	0,69	0,60
$S+X_{весна}$	0,75	0,56	0,82	0,53	0,65	0,66	0,78	0,63
Три фактора								
$S+Q_{нач}+D_{нач}$	0,69	0,58	0,73	0,68	0,59	0,71	0,67	0,76
$S+Q_{нач}+\Sigma T$	0,69	0,48	0,73	0,55	0,60	0,61	0,63	0,73
$S+Q_{нач}+X_{сент}$	0,70	0,60	0,74	0,55	0,60	0,69	0,71	0,77
$S+Q_{нач}+X_{окт}$	0,69	0,59	0,74	0,56	0,62	0,69	0,71	0,77
$S+Q_{нач}+X_{весна}$	0,76	0,56	0,82	0,55	0,73	0,75	0,79	0,74
$S+D_{нач}+\Sigma T$	0,69	0,55	0,75	0,69	0,54	0,54	0,62	0,58
$S+D_{нач}+X_{сент}$	0,70	0,64	0,76	0,65	0,56	0,57	0,69	0,61
$S+D_{нач}+X_{окт}$	0,69	0,64	0,75	0,69	0,53	0,57	0,69	0,60
$S+D_{нач}+X_{весна}$	0,76	0,59	0,83	0,68	0,65	0,67	0,78	0,63
$S+\Sigma T+X_{сент}$	0,70	0,53	0,75	0,52	0,60	0,51	0,67	0,58
$S+\Sigma T+X_{окт}$	0,69	0,53	0,75	0,58	0,57	0,52	0,68	0,58
$S+\Sigma T+X_{весна}$	0,76	0,52	0,82	0,53	0,59	0,81	0,79	0,61
$S+X_{сент}+X_{весна}$	0,76	0,58	0,82	0,52	0,73	0,66	0,78	0,64
$S+X_{окт}+X_{весна}$	0,76	0,20	0,82	0,57	0,68	0,66	0,78	0,64

Фактор	Кама-Бондлог	Вишера-Рябинино	Яйва-Усть-Игум	Иньва-Слудка	Косьва-Останино (Перемское)	Обва-Карагай	Чусовая-Лямино	Сыла-Подкаменное (Сыльвенск)
Четыре фактора								
$S+Q_{нач}+D_{нач}+X_{весна}$	0,76	0,59	0,83	0,67	0,73	0,75	0,79	0,75
$S+Q_{нач}+D_{нач}+\Sigma T+$	0,70	0,55	0,75	0,67	0,60	0,64	0,64	0,73
$S+Q_{нач}+D_{нач}+X_{сент}$	0,70	0,65	0,76	0,66	0,60	0,70	0,72	0,77
$S+Q_{нач}+\Sigma T+X_{сент}$	0,71	0,53	0,75	0,56	0,62	0,64	0,70	0,75
$S+Q_{нач}+\Sigma T+X_{окт}$	0,69	0,53	0,75	0,58	0,63	0,63	0,70	0,75
$S+Q_{нач}+\Sigma T+X_{весна}$	0,76	0,52	0,82	0,55	0,67	0,87	0,65	0,72
$S+Q_{нач}+D_{нач}+X_{окт}$	0,69	0,64	0,75	0,68	0,62	0,70	0,72	0,77
$S+D_{нач}+\Sigma T+X_{сент}$	0,70	0,61	0,77	0,67	0,60	0,54	0,67	0,58
$S+D_{нач}+\Sigma T+X_{окт}$	0,70	0,61	0,76	0,73	0,58	0,54	0,68	0,59
$S+D_{нач}+\Sigma T+X_{весна}$	0,77	0,57	0,83	0,69	0,59	0,81	0,80	0,61
$S+D_{нач}+X_{сент}+X_{весна}$	0,76	0,63	0,83	0,68	0,74	0,66	0,78	0,64
$S+D_{нач}+X_{окт}+X_{весна}$	0,77	0,62	0,83	0,73	0,68	0,66	0,77	0,64
$S+Q_{нач}+X_{сент}+X_{весна}$	0,76	0,59	0,82	0,55	0,76	0,74	0,79	0,76
$S+Q_{нач}+X_{окт}+X_{весна}$	0,76	0,58	0,82	0,57	0,74	0,74	0,79	0,76

Самые высокие коэффициенты парной корреляции получены в моделях от максимального снегозапаса (S_{max}), суммы осадков за период половодья ($\Sigma X_{весна}$) и предикторов, таких как дата начала весеннего половодья ($D_{нач}$) или расход воды на дату начала весеннего половодья ($Q_{нач}$). Если осадки за период весеннего половодья ($\Sigma X_{весна}$) как фактор исключался из модели, то теснота связи между объемом стока воды (W) и суммой факторов становится ниже и изменяется в пределах $R=0,48-0,76$.

Также, нужно отметить, что в комбинации факторов, где участвует величина осеннего увлажнения бассейна, рассчитанная от 1 сентября ($U_{сент}$) теснота связи лучше, чем от 1 октября ($U_{окт}$). Потому, что в первом случае учитывается частичный дополнительный объем стока летне-осенних паводков, который значительно увеличивает тесноту связи.

При добавлении четвертого фактора в модель множественной регрессии для некоторых комбинаций теснота связи увеличивается, но незначительно ($R = 0,76-0,77$). Полученное уточнение модели использовать нецелесообразно, т.к. при увеличении количества факторов в расчет вносится дополнительная ошибка.

После исследования комплексного учета факторов, влияющих на формирования весеннего половодья и выявления наилучших моделей множественной линейной регрессии, для восьми входных створов были рассчитаны характеристики качества. Рассмотрим более подробно полученные результаты на примере г/п Кама-Бондюг (табл. 5.7).

Анализ таблицы показал, что по критериям S/σ и по NSE регрессионные модели как с одним, так и с несколькими факторами можно использовать для расчета. Критерий качества S/σ изменяется в пределах 0,63-0,80. Лучшее качество имеют регрессионные модели от двух, трех и четырех факторов. Критерий Нэша-Сатклиффа (NSE) изменяется обратно пропорционально критерию S/σ и составляет 0,43-0,65. Средняя ошибка расчетов (δ_{cp}) изменяется в пределах 11-14%. Наибольшие средние ошибки расчетов были выявлены для моделей с одним и четырьмя факторами.

Оправдываемость расчетов рассчитана двумя способами:

- 1) по разработанной модели ($P1$);
- 2) по среднему значению ряда ($P2$).

Выявлено, что по разработанной модели оправдываемость оказалась существенно выше, чем по среднему значению ряда (табл. 5.7). Данное сравнение необходимо выполнить, так как по Наставлению... (1962), оправдываемость расчета должна быть выше, чем оправдываемость по норме. В первом случае с увеличением количества используемых факторов в модели величина оправдываемости возрастает. Для модели с одним фактором снегозапасов величина $P1$ составляет 65%. Наибольшая оправдываемость расчета приходится на сумму трех ($S_{max}+U_{окт}+\sum x_{весна}$) и четырех факторов ($S_{max}+D_{нач}+\sum t_++\sum x_{весна}$), ($S_{max}+D_{нач}+U_{окт}+\sum x_{весна}$) и составляет 81%. Величина оправдываемости по разработанной модели у других комбинаций факторов значительно не отличается друг от друга и изменяется в пределах 65-79%. Во втором случае, величина оправдываемости расчета по среднему значению ряда ($P2$) существенно не изменяется от количества участвующих в модели факторов и варьирует в пределах 47-50%. Для модели с одним фактором оправдываемость по среднему значению составляет 47%, с двумя факторами – 48%, с тремя и четырьмя факторами 48-50%, что существенно ниже, чем оправдываемость по разработанной модели.

Аналогичным образом был выполнен анализ для остальных входных створов Камского водохранилища (табл. 5.7-5.14). В целом для левобережных входных створов (г/п р. Вишера-Рябинино, р. Яйва-Усть-Игум, р. Косьва-Останино

(Перемское), р. Чусовая-Лямино, р. Сытва-Подкаменное (Сылвенск) критерий качества S/σ изменяется в пределах от 0,59 до 0,86; критерий Нэша-Сатклиффа (NSE) – от 0,43 до 0,65. Лучшее качество имеют регрессионные модели от одного, двух и трех факторов. Средняя ошибка расчетов (δ_{cp}) изменяется в пределах 11-21%. Наибольшие средние ошибки расчетов характерны для моделей с одним и двумя факторами.

Высокая оправдываемость расчета по разработанной модели ($P1 > 70\%$) характерна для комбинаций из трёх и четырех факторов $S_{max}+D_{нач}$ (или $Q_{нач}$)+ $U_{сент}$; $S_{max}+D_{нач}$ (или $Q_{нач}$)+ $U_{окт}$; $S_{max}+D_{нач}+\sum x_{весна}$; $S_{max}+Q_{нач}+X_{сент}+\sum x_{весна}$; $S_{max}+Q_{нач}+D_{нач}+\sum x_{весна}$. Величина оправдываемости расчетов по среднему значению ряда ($P2$) существенно ниже, чем оправдываемость по разработанной модели и соответствует 29-55%.

Для правобережных входных створов (г/п р. Иньва-Слудка, р. Обва-Карагай) критерий качества S/σ изменяется в пределах от 0,57 до 0,84; критерий Нэша-Сатклиффа (NSE) – от 0,29 до 0,75. Лучшее качество имеют регрессионные модели от одного, двух и трех факторов. Средняя ошибка расчетов (δ_{cp}) изменяется в пределах 13-26%. Наибольшие средние ошибки расчетов характерны для моделей с одним, двумя и четырьмя факторами. Высокая оправдываемость расчета по разработанной модели ($P1 > 76\%$) характерна для комбинаций из четырех факторов $S_{max}+D_{нач}+\sum t_{+}+\sum x_{весна}$; $S_{max}+Q_{нач}+\sum t_{+}+\sum x_{весна}$; $S_{max}+Q_{нач}+D_{нач}+\sum x_{весна}$. Величина оправдываемости методики прогностов по среднему значению ряда ($P2$) существенно ниже, чем оправдываемость по разработанной модели и соответствует 36-60%.

Характеристики качества модели множественной линейной регрессии для определения объема стока воды W (млн куб. км) от основных факторов (г/п р. Кама-Бондюг)

Фактор	R	δ_{cp}	S	σ	S/σ	NSE	P_1	P_2
Один фактор								
S_{max}	0,68	14	1,43	1,88	0,76	0,49	65	47
Два фактора								
$S_{max} + U_{сент}$	0,70	13	1,46	1,84	0,80	0,44	70	48
$S_{max} + \sum X_{весна}$	0,75	11	1,18	1,84	0,64	0,64	76	48
Три фактора								
$S_{max} + Q_{нач} + \sum X_{весна}$	0,76	11	1,18	1,84	0,64	0,64	76	48
$S_{max} + D_{нач} + \sum X_{весна}$	0,76	11	1,18	1,84	0,64	0,64	79	48
$S_{max} + \sum t_+ + \sum X_{весна}$	0,76	12	1,26	1,91	0,66	0,63	75	50
$S_{max} + U_{сент} + \sum X_{весна}$	0,76	11	1,14	1,83	0,63	0,64	76	49
$S_{max} + U_{окт} + \sum X_{весна}$	0,76	11	1,17	1,80	0,65	0,64	81	48
Четыре фактора								
$S_{max} + Q_{нач} + D_{нач} + \sum X_{весна}$	0,76	11	1,18	1,84	0,64	0,64	79	48
$S_{max} + Q_{нач} + \sum t_+ + \sum X_{весна}$	0,76	12	1,25	1,91	0,66	0,63	75	50
$S_{max} + D_{нач} + \sum t_+ + \sum X_{весна}$	0,77	12	1,25	1,91	0,66	0,63	81	50
$S_{max} + D_{нач} + U_{сент} + \sum X_{весна}$	0,76	11	1,17	1,83	0,64	0,64	76	49
$S_{max} + D_{нач} + U_{окт} + \sum X_{весна}$	0,77	11	1,17	1,84	0,63	0,65	81	48
$S_{max} + Q_{нач} + U_{сент} + \sum X_{весна}$	0,76	14	1,46	1,85	0,79	0,44	68	49
$S_{max} + Q_{нач} + U_{окт} + \sum X_{весна}$	0,76	14	1,49	1,87	0,79	0,43	67	50

Примечание: R – коэффициент множественной линейной регрессии; δ_{cp} – средняя ошибка, %; S – стандартная ошибка, млн куб. км; σ – среднее квадратическое отклонение, млн куб. км; S/σ – критерий качества метода расчета по Наставлению..., (1962); NSE – критерий качества моделей Нэша-Сатклиффа (Moriasi et al., 2015); P_1 – оправдываемость расчета по разработанной модели, %; P_2 – оправдываемость при выпуске расчета по средней величине, %.

Характеристики качества модели множественной линейной регрессии для определения объема стока воды W (млн куб. км) от основных факторов (г/п р. Вишера-Рябинино)

Фактор	R	δ_{cp}	S	σ	S/σ	NSE	P_1	P_2
Один фактор								
S_{max}	0,53	14	1,73	2,02	0,86	0,28	58	51
Два фактора								
$S_{max} + D_{нач}$	0,58	14	1,67	2,02	0,82	0,34	63	51
$S_{max} + U_{сент}$	0,59	14	1,64	2,01	0,82	0,35	67	55
$S_{max} + U_{окт}$	0,59	14	1,65	2,01	0,82	0,34	67	55
Три фактора								
$S_{max} + Q_{нач} + U_{сент}$	0,60	14	1,63	2,01	0,81	0,36	64	55
$S_{max} + D_{нач} + U_{сент}$	0,64	13	1,57	2,01	0,78	0,40	69	55
$S_{max} + D_{нач} + U_{окт}$	0,64	13	1,57	2,01	0,78	0,40	69	55
Четыре фактора								
$S_{max} + Q_{нач} + D_{нач} + U_{сент}$	0,65	13	1,55	2,01	0,77	0,42	60	55
$S_{max} + Q_{нач} + D_{нач} + U_{окт}$	0,64	13	1,56	2,01	0,78	0,41	60	55
$S_{max} + D_{нач} + U_{сент} + \sum x_{весна}$	0,63	13	1,58	2,00	0,79	0,39	66	54

Примечание: R – коэффициент множественной линейной регрессии; δ_{cp} – средняя ошибка, %; S – стандартная ошибка, млн куб. км; σ – среднее квадратическое отклонение, млн куб. км; S/σ – критерий качества методик расчета по Наставлению..., (1962); NSE – критерий качества моделей Нэша-Сатклиффа (Moriasi et al., 2015); P_1 – оправдываемость расчета по разработанной модели, %; P_2 – оправдываемость при выпуске расчета по средней величине, %.

Таблица 5.9

Характеристики качества модели множественной линейной регрессии для определения объема стока воды W (млн куб. км) от основных факторов (г/п р. Яйва-Усть-Игум)

Фактор	R	δ_{cp}	S	σ	S/σ	NSE	P_1	P_2
Один фактор								
S_{max}	0,72	13	0,28	0,4	0,71	0,51	63	47
Два фактора								
$S_{max} + U_{сент}$	0,74	13	0,27	0,39	0,69	0,55	67	45
$S_{max} + \sum x_{весна}$	0,82	12	0,24	0,39	0,62	0,64	76	45
Три фактора								
$S_{max} + Q_{нач} + \sum x_{весна}$	0,82	11	0,23	0,39	0,60	0,67	79	48
$S_{max} + D_{нач} + \sum x_{весна}$	0,83	11	0,23	0,39	0,59	0,68	81	48
$S_{max} + \sum t_+ + \sum x_{весна}$	0,82	11	0,23	0,39	0,59	0,68	78	49
$S_{max} + U_{сент} + \sum x_{весна}$	0,82	11	0,23	0,38	0,60	0,67	76	46
$S_{max} + U_{окт} + \sum x_{весна}$	0,82	11	0,23	0,38	0,60	0,67	76	46
Четыре фактора								
$S_{max} + Q_{нач} + D_{нач} + \sum x_{весна}$	0,83	11	0,23	0,39	0,60	0,68	79	48
$S_{max} + Q_{нач} + \sum t_+ + \sum x_{весна}$	0,82	11	0,23	0,39	0,60	0,68	78	49
$S_{max} + D_{нач} + \sum t_+ + \sum x_{весна}$	0,83	11	0,23	0,39	0,59	0,69	80	49
$S_{max} + D_{нач} + U_{сент} + \sum x_{весна}$	0,83	11	0,23	0,38	0,59	0,68	78	46
$S_{max} + D_{нач} + U_{окт} + \sum x_{весна}$	0,83	11	0,23	0,38	0,60	0,68	76	46
$S_{max} + Q_{нач} + U_{сент} + \sum x_{весна}$	0,82	11	0,23	0,38	0,61	0,67	76	46
$S_{max} + Q_{нач} + U_{окт} + \sum x_{весна}$	0,82	11	0,23	0,38	0,61	0,67	76	46

Примечание: R – коэффициент множественной линейной регрессии; δ_{cp} – средняя ошибка, %; S – стандартная ошибка, млн куб. км; σ – среднее квадратическое отклонение, млн куб. км; S/σ – критерий качества методик расчета по Наставлению..., (1962); NSE – критерий качества моделей Нэша-Сатклиффа (Moriasi et al., 2015); P_1 – оправдываемость расчета по разработанной модели, %; P_2 – оправдываемость при выпуске расчета по средней величине, %.

Характеристики качества модели множественной линейной регрессии для определения объема стока воды W (млн куб. км) от основных факторов (г/п р. Иньва-Слудка)

Фактор	R	δ_{cp}	S	σ	S/σ	NSE	P_1	P_2
Один фактор								
S_{max}	0,54	18	0,12	0,14	0,85	0,29	62	56
Два фактора								
$S_{max} + Q_{нач}$	0,57	16	0,11	0,13	0,85	0,32	67	56
$S_{max} + D_{нач}$	0,69	16	0,10	0,13	0,75	0,47	61	53
Три фактора								
$S_{max} + Q_{нач} + D_{нач}$	0,68	14	0,1	0,12	0,77	0,46	64	52
$S_{max} + D_{нач} + \sum t_+$	0,69	16	0,1	0,14	0,77	0,47	64	52
$S_{max} + D_{нач} + U_{окт}$	0,69	13	0,09	0,12	0,76	0,48	63	49
$S_{max} + D_{нач} + \sum x_{весна}$	0,68	15	0,1	0,13	0,77	0,47	63	51
Четыре фактора								
$S_{max} + D_{нач} + \sum t_+ + \sum x_{весна}$	0,69	26	0,52	0,47	1,12	-0,13	76	60
$S_{max} + D_{нач} + \sum t_+ + \sum x_{весна}$	0,73	12	0,09	0,12	0,73	0,54	69	47
$S_{max} + D_{нач} + U_{окт} + \sum x_{весна}$	0,73	11	0,09	0,12	0,73	0,54	71	50

Примечание: R – коэффициент множественной линейной регрессии; δ_{cp} – средняя ошибка, %; S – стандартная ошибка, млн куб. км; σ – среднее квадратическое отклонение, млн куб. км; S/σ – критерий качества методик расчета по Наставлению..., (1962); NSE – критерий качества моделей Нэша-Сатклиффа (Moriasi et al., 2015); P_1 – оправдываемость расчета по разработанной модели, %; P_2 – оправдываемость при выпуске расчета по средней величине, %.

Характеристики качества модели множественной линейной регрессии для определения объема стока воды W (млн куб. км) от основных факторов (г/п р. Косьва-Останино (Перемское))

Фактор	R	δ_{cp}	S	σ	S/σ	NSE	P_1	P_2
Один фактор								
S_{max}	0,49	20	0,34	0,38	0,88	0,24	46	56
$\sum x_{весна}$	0,66	17	0,31	0,41	0,74	0,47	67	55
Два фактора								
$S_{max} + Q_{нач}$	0,58	18	0,32	0,38	0,80	0,34	65	56
$S_{max} + \sum x_{весна}$	0,65	17	0,29	0,38	0,78	0,43	60	58
Три фактора								
$S_{max} + Q_{нач} + \sum x_{весна}$	0,76	15	0,27	0,38	0,72	0,53	72	56
$S_{max} + U_{сент} + \sum x_{весна}$	0,73	14	0,27	0,38	0,71	0,54	72	59
$S_{max} + U_{окт} + \sum x_{весна}$	0,68	17	0,29	0,38	0,77	0,46	67	59
Четыре фактора								
$S_{max} + Q_{нач} + D_{нач} + \sum x_{весна}$	0,73	15	0,28	0,38	0,72	0,54	69	54
$S_{max} + D_{нач} + U_{сент} + \sum x_{весна}$	0,74	14	0,27	0,38	0,72	0,54	72	59
$S_{max} + Q_{нач} + U_{сент} + \sum x_{весна}$	0,76	14	0,27	0,39	0,69	0,56	76	58
$S_{max} + Q_{нач} + U_{окт} + \sum x_{весна}$	0,74	15	0,27	0,39	0,71	0,55	71	55

Примечание: R – коэффициент множественной линейной регрессии; δ_{cp} – средняя ошибка, %; S – стандартная ошибка, млн куб. км; σ – среднее квадратическое отклонение, млн куб. км; S/σ – критерий качества методик расчета по Наставлению..., (1962); NSE – критерий качества моделей Нэша-Сатклиффа (Mogias et al., 2015); P_1 – оправдываемость расчета по разработанной модели, %; P_2 – оправдываемость при выпуске расчета по средней величине, %.

Характеристики качества модели множественной линейной регрессии для определения объема стока воды W (млн куб. км) от основных факторов (г/п р. Обва-Карагай)

Фактор	R	δ_{cp}	S	σ	S/σ	NSE	P_1	P_2
Один фактор								
S_{max}	0,55	23	0,11	0,14	0,84	0,31	51	36
$Q_{нач}$	0,60	25	0,12	0,15	0,81	0,36	56	44
Два фактора								
$S_{max} + Q_{нач}$	0,70	19	0,10	0,14	0,74	0,48	68	38
$S_{max} + \sum x_{весна}$	0,66	20	0,10	0,13	0,77	0,44	64	42
Три фактора								
$S_{max} + Q_{нач} + D_{нач}$	0,71	19	0,10	0,14	0,74	0,50	68	32
$S_{max} + Q_{нач} + \sum x_{весна}$	0,75	17	0,09	0,14	0,69	0,56	68	41
$S_{max} + \sum t_{++} + \sum x_{весна}$	0,81	15	0,08	0,13	0,64	0,66	74	53
Четыре фактора								
$S_{max} + Q_{нач} + D_{нач} + \sum x_{весна}$	0,75	17	0,10	0,14	0,70	0,57	65	38
$S_{max} + Q_{нач} + \sum t_{++} + \sum x_{весна}$	0,87	13	0,07	0,13	0,57	0,75	89	53
$S_{max} + D_{нач} + \sum t_{++} + \sum x_{весна}$	0,81	15	0,09	0,13	0,66	0,66	74	53
$S_{max} + Q_{нач} + U_{сент} + \sum x_{весна}$	0,74	17	0,10	0,14	0,71	0,55	76	42

Примечание: R – коэффициент множественной линейной регрессии; δ_{cp} – средняя ошибка, %; S – стандартная ошибка, млн куб. км; σ – среднее квадратическое отклонение, млн куб. км; S/σ – критерий качества методик расчета по Наставлению..., (1962); NSE – критерий качества моделей Нэша-Сатклиффа (Mogiasi et al., 2015); P_1 – оправдываемость расчета по разработанной модели, %; P_2 – оправдываемость при выпуске расчета по средней величине, %.

Характеристики качества модели множественной линейной регрессии для определения объема стока воды W (млн куб. км) от основных факторов (г/п р. Чусовая-Лямино)

Фактор	R	δ_{cp}	S	σ	S/σ	NSE	P_1	P_2
Один фактор								
S_{max}	0,64	16	0,73	0,94	0,78	0,41	65	38
$\sum X_{весна}$	0,58	21	0,87	1,05	0,83	0,33	52	36
Два фактора								
$S_{max} + U_{сент}$	0,69	15	0,71	0,95	0,75	0,47	66	37
$S_{max} + \sum X_{весна}$	0,78	14	0,61	0,93	0,65	0,60	62	38
Три фактора								
$S_{max} + Q_{нач} + \sum X_{весна}$	0,79	13	0,59	0,93	0,64	0,63	67	38
$S_{max} + D_{нач} + \sum X_{весна}$	0,78	14	0,61	0,93	0,66	0,60	64	38
$S_{max} + \sum t_+ + \sum X_{весна}$	0,79	13	0,6	0,94	0,64	0,63	64	45
$S_{max} + U_{сент} + \sum X_{весна}$	0,78	14	0,61	0,95	0,64	0,61	65	38
Четыре фактора								
$S_{max} + Q_{нач} + D_{нач} + \sum X_{весна}$	0,79	13	0,59	0,93	0,63	0,63	69	38
$S_{max} + D_{нач} + \sum t_+ + \sum X_{весна}$	0,80	13	0,60	0,94	0,64	0,65	64	42
$S_{max} + D_{нач} + U_{сент} + \sum X_{весна}$	0,78	14	0,63	0,95	0,66	0,61	65	38
$S_{max} + D_{нач} + U_{окт} + \sum X_{весна}$	0,77	14	0,62	0,93	0,66	0,61	62	38
$S_{max} + Q_{нач} + U_{сент} + \sum X_{весна}$	0,79	14	0,61	0,95	0,64	0,63	70	38
$S_{max} + Q_{нач} + U_{окт} + \sum X_{весна}$	0,79	13	0,59	0,94	0,63	0,62	63	39

Примечание: R – коэффициент множественной линейной регрессии; δ_{cp} – средняя ошибка, %; S – стандартная ошибка, млн куб. км; σ – среднее квадратическое отклонение, млн куб. км; S/σ – критерий качества методик расчета по Наставлению..., (1962); NSE – критерий качества моделей Нэша-Сатклиффа (Moriassi et al., 2015); P_1 – оправдываемость расчета по разработанной модели, %; P_2 – оправдываемость при выпуске расчета по средней величине, %.

Характеристики качества модели множественной линейной регрессии для определения объема стока воды W (млн куб. км) от основных факторов (г/п р. Сылва-Подкаменное (Сылвенск))

Фактор	R	δ_{cp}	S	σ	S/σ	NSE	P_1	P_2
Один фактор								
S_{max}	0,60	18	0,52	0,65	0,81	0,36	56	33
$Q_{нач}$	0,67	18	0,50	0,66	0,76	0,44	67	31
Два фактора								
$S_{max} + Q_{нач}$	0,75	17	0,44	0,66	0,67	0,57	74	31
$S_{max} + \sum X_{весна}$	0,63	18	0,51	0,61	0,73	0,34	56	41
Три фактора								
$S_{max} + Q_{нач} + D_{нач}$	0,76	15	0,45	0,66	0,68	0,57	72	31
$S_{max} + Q_{нач} + U_{сент}$	0,77	14	0,44	0,67	0,66	0,60	79	29
$S_{max} + Q_{нач} + U_{окт}$	0,77	14	0,44	0,67	0,66	0,59	79	29
$S_{max} + Q_{нач} + \sum X_{весна}$	0,74	15	0,45	0,66	0,69	0,55	68	38
Четыре фактора								
$S_{max} + Q_{нач} + D_{нач} + \sum X_{весна}$	0,75	15	0,45	0,66	0,68	0,56	70	38
$S_{max} + Q_{нач} + D_{нач} + \sum X_{весна}$	0,77	14	0,44	0,67	0,66	0,60	79	29
$S_{max} + Q_{нач} + D_{нач} + \sum X_{весна}$	0,77	14	0,44	0,67	0,66	0,59	79	29
$S_{max} + Q_{нач} + U_{сент} + \sum X_{весна}$	0,76	15	0,46	0,66	0,69	0,58	72	36
$S_{max} + Q_{нач} + U_{окт} + \sum X_{весна}$	0,76	14	0,46	0,66	0,69	0,58	81	36

Примечание: R – коэффициент множественной линейной регрессии; δ_{cp} – средняя ошибка, %; S – стандартная ошибка, млн куб. км; σ – среднее квадратическое отклонение, млн куб. км; S/σ – критерий качества методик расчета по Наставлению..., (1962); NSE – критерий качества моделей Нэша-Сатклиффа (Moriasi et al., 2015); P_1 – оправдываемость расчета по разработанной модели, %; P_2 – оправдываемость при выпуске расчета по средней величине, %.

Расчет суммарного притока воды в Камское водохранилище выполнен с помощью полученных уравнений зависимости объема стока воды W от основных факторов. Для каждого частного водосбора выбраны два вида уравнения связи множественной регрессии: 1) с учетом фактора осадков за период весеннего половодья ($\sum x_{весна}$); 2) с отсутствием указанного фактора (табл. 5.15). При выборе уравнений проанализирована оценка вклада каждого фактора и их взаимодействия, поскольку эффект одного фактора может изменяться в зависимости от значений других. Уравнения, подходящие по основным критериям качества моделей (δ_{cp} , S/σ , NSE , P_I), в дальнейшем использованы для расчета объема стока воды в водохранилище.

Таблица 5.15

Модели множественной регрессии для частных водосборов, подходящие по основным критериям качества

№	Река-пост	Уравнение модели множественной регрессии	S/σ	P
С участием фактора $\sum x$				
1	Кама-Бондюг	$W = 0,030 \cdot S_{max} - 0,005 \cdot X_{окт} + 0,011 \cdot \sum x_{весна} + 0,410$	0,65	81
2	Вишера-Рябинино	-	-	-
3	Яйва-Усть-Игум	$W = 0,005 \cdot S_{max} - 0,005 \cdot D_{нач} + 0,003 \cdot \sum x_{весна} + 0,579$	0,59	81
4	Иньва-Слудка	$W = 0,001 \cdot S_{max} + 0,008 \cdot D_{нач} - 0,002 \cdot U_{окт} + 0,001 \cdot \sum x_{весна} + 0,255$	0,73	71
5	Косьва-Останино (Перемское)	$W = 0,002 \cdot S_{max} + 0,002 \cdot U_{сент} + 0,004 \cdot \sum x_{весна} + 0,056$	0,71	72
6	Обва-Карагай	$W = 0,002 \cdot S_{max} + 0,008 \cdot Q_{нач} + 0,000 \cdot \Sigma t_{++} + 0,003 \cdot \sum x_{весна} - 0,091$	0,57	89
7	Чусовая-Лямино	$W = 0,014 \cdot S_{max} + 0,008 \cdot Q_{нач} + 0,009 \cdot \sum x_{весна} + 0,221$	0,64	67
8	Сылва-Подкаменное (СЫЛВЕНСК)	$W = 0,007 \cdot S_{max} + 0,023 \cdot Q_{нач} + 0,004 \cdot U_{окт} + 0,002 \cdot \sum x_{весна} - 0,602$	0,69	81
Без участия фактора $\sum x$				
1	Кама-Бондюг	$W = 0,030 \cdot S_{max} + 0,003 \cdot U_{сент} + 1,192$	0,80	70
2	Вишера-Рябинино	$W = 0,025 \cdot S_{max} + 0,055 \cdot D_{нач} + 0,003 \cdot U_{сент} - 0,431$	0,78	69
3	Яйва-Усть-Игум	$W = 0,006 \cdot S_{max} + 0,001 \cdot U_{сент} + 0,347$	0,69	67
4	Иньва-Слудка	$W = 0,001 \cdot S_{max} + 0,008 \cdot D_{нач} - 0,002 \cdot U_{окт} + 0,201$	0,76	65
5	Косьва-Останино (Перемское)	$W = 0,003 \cdot S_{max} + 0,008 \cdot Q_{нач} + 0,225$	0,80	65
6	Обва-Карагай	$W = 0,002 \cdot S_{max} + 0,012 \cdot Q_{нач} - 0,003 \cdot D_{нач} + 0,147$	0,74	68
7	Чусовая-Лямино	$W = 0,015 \cdot S_{max} + 0,002 \cdot U_{сент} + 1,141$	0,75	66
8	Сылва-Подкаменное (СЫЛВЕНСК)	$W = 0,008 \cdot S_{max} + 0,023 \cdot Q_{нач} + 0,002 \cdot U_{сент} - 0,631$	0,66	79

Таблица 5.16

Ошибка расчета суммарного притока воды в Камское водохранилище при сравнении фактических и расчетных значений объемов стока за период 1968-2010 гг.

Год	Ошибка расчета			
	млн куб. км		%	
	Расчет без осадков весной	Расчет с осадками весной	Расчет без осадков весной	Расчет с осадками весной
1968	-0,2	0,8	-1	3
1969	6,3	5,4	18	19
1970	3,1	3,4	9	11
1971	2,2	0,4	6	1
1972	4,1	2,3	12	7
1973	-4,8	-2,7	-19	-9
1974	5,6	3,8	13	10
1975	-4,2	-3,3	-21	-14
1976	-4,0	-3,0	-14	-9
1979	2,3	2,8	6	7
1980	-1,2	-0,7	-4	-3
1981	0,8	1,4	2	4
1982	-2,0	-1,0	-7	-3
1983	0,7	1,9	3	7
1984	-2,6	-0,6	-10	-2
1985	-1,3	-1,1	-4	-3
1986	-2,6	-2,6	-9	-8
1987	-1,4	-1,2	-5	-4
1988	-2,0	-2,9	-9	-12
1989	-2,9	-3,3	-9	-9
1990	11,8	8,1	24	22
1991	-1,4	0,5	-4	1
1992	-4,3	-1,9	-12	-5
1993	5,2	2,7	13	8
1994	-1,4	-2,9	-5	-10
1995	-1,1	-0,2	-4	-1
1996	1,2	-0,3	4	-1
1997	6,7	5,4	19	18
1998	-2,9	-2,0	-8	-5
1999	0,9	0,7	2	2
2000	2,1	-0,1	6	0
2001	1,3	0,7	3	2
2002	3,4	4,0	8	11
2003	-0,7	-0,9	-2	-3
2004	-5,6	-6,0	-20	-18
2005	-2,2	-2,1	-9	-8
2006	-1,9	-3,4	-7	-12
2007	1,0	-0,3	3	-1
2008	-2,3	-2,1	-8	-7
2009	-2,1	-1,4	-8	-5
2010	-4,4	-3,9	-19	-14
Среднее	0	0	-1,6	-0,8

С помощью выбранных моделей и соответствующего им уравнения связи для каждого частного водосбора рассчитаны значения суммарного притока воды в Камское водохранилище за исследуемый период и определена ошибка расчета при сравнении фактических и полученных расчетных значений (табл. 5.16).

Анализ полученных результатов показал (табл. 5.16), что при сравнении фактических значений притока воды с расчетными, средняя ошибка по уравнению модели без осадков в период весеннего половодья составляет 1,6%, по уравнению с использованием осадков в половодье – 0,8%, при этом ошибка расчета по методике, разработанной ГГИ (1977 г.) и используемой в Уральском УГМС, выше (2,9%).

Наибольшие ошибки расчета притока воды были выявлены в многоводные годы. Так, весной 1990 г. приток в Камское водохранилище был наибольший 49,1 млн куб. км, в этот год погрешность расчета по разработанной методике составила 24%, что является наибольшей погрешностью. Также большие ошибки расчета характерны для многоводных 1969 г. и 1997 г.

Для маловодных лет также характерны наибольшие ошибки расчетов, так, например, весной 1975 г. приток в водохранилище был наименьший за весь период наблюдений, при этом ошибка расчета составила 14-21%. Максимальные ошибки расчета связаны с недоучетом условий в период снеготаяния. Так, например разработанный расчет является долгосрочным и не учитывает изменение метеорологических условий за период заблаговременности. Это вносит долю неопределенности в расчет. Лучше всего оправдываются расчеты в годы близкие к средним по водности. При этом, при использовании уравнений без учета осадков в весенний период ошибка расчета в 9% и менее наблюдается в 69% случаев. При использовании осадков в весенний период ошибка расчета в 9% и менее наблюдается в 71% случаев.

Анализ сходимости результатов расчета показал, что разработанный расчет притока воды в Камское водохранилище имеет хорошие результаты (рис. 5.6). Только в годы экстремальной водности, как высокой, так и низкой, результаты расчетов характеризуются большими ошибками.

Средняя заблаговременность расчета притока за половодье составила 81 день. Долгосрочные расчеты стока или прогнозы принято выражать в форме «выше нормы», «соответствует норме» и «ниже нормы». Так, зная пограничные значения

объема стока воды за половодье (табл. 5.17) и рассчитанные значения стока, можно определить какое по водности будет половодье, и соответственно водность года. Для Камского водохранилища за исследуемый многолетний период (1968-2010 гг.) выделены характерные значения объема стока воды за период весеннего половодья для лет разной водности. Для этого ряд со значениями объема стока ранжировался в порядке убывания и делился на 3 группы характерной водности согласно СП 529.1325800.2023: многоводные ($P < 33,3\%$), средние по водности ($33,3\% \leq P \leq 66,7\%$) и маловодные ($P > 66,7\%$) годы (табл. 5.17).

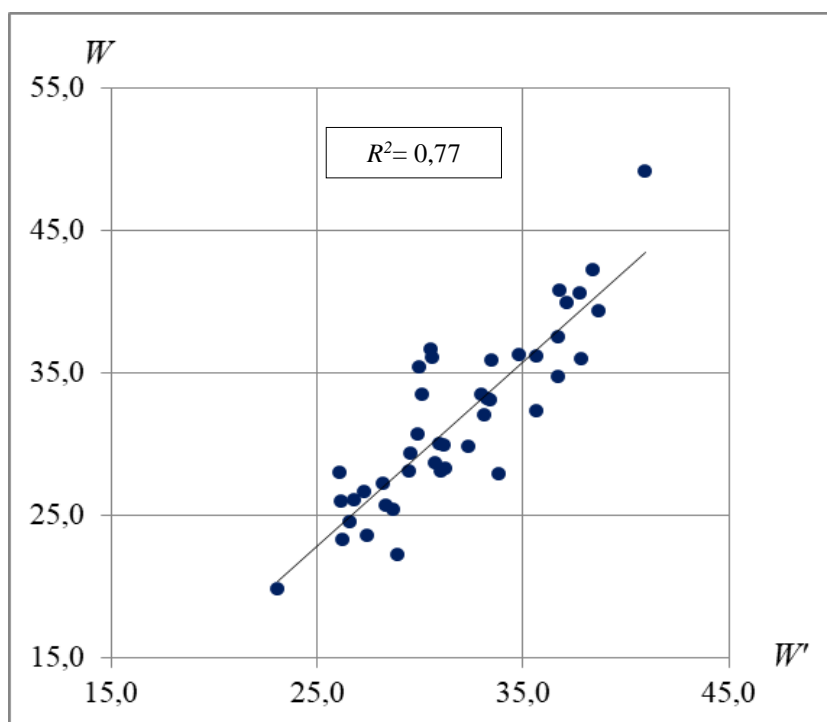


Рис. 5.6. Связь фактического (W , млн куб. км) и рассчитанного (W' , млн куб. км) объема притока воды в Камское водохранилище за весеннее половодье

Таблица 5.17

Характерные значения объема притока воды W (млн. куб. км) в Камское водохранилище за период весеннего половодья для разных групп водности

Группы водности	Обеспеченность	Объем стока за половодье, млн куб. км
Многоводные	$P \leq 33,3\%$	более 35,4
Средние	$33,4\% \geq P \geq 66,7\%$	35,3-28,1
Маловодные	$66,8\% \geq P$	менее 28,0

5.3. Оценка качества алгоритма расчета

Оценка качества алгоритма расчета притока и общей водности выполнена на независимом материале за период 2011-2020 гг. В соответствии с Наставлением... (1962), для расчетов рассчитывается оправдываемость по разработанной методике и по норме. Оправдываемость расчетов по разработанным методикам, определялась с учетом допустимой погрешности расчета, по двум видам уравнений (табл. 5.18).

Таблица 5.18

Оправдываемость проверочных расчетов объема притока воды в Камское водохранилище за период 2011-2022 гг.

№ п/п	Река-пост	С участием фактора $\Sigma x_{весна}$			Без участия фактора $\Sigma x_{весна}$		
		$\delta_{доп}$, МЛН куб. км	P_1 , %	P_2 , %	$\delta_{доп}$, МЛН куб. км	P_1 , %	P_2 , %
1	Кама-Бондюг	1,22	90	60	1,22	90	60
2	Вишера-Рябинино				1,35	90	40
3	Яйва-Усть-Игум	0,26	90	60	0,26	60	50
4	Иньва-Слудка	0,08	70	50	0,08	70	50
5	Косьва-Останино (Перемское)	0,26	90	70	0,26	90	70
6	Обва-Карагай	0,09	60	50	0,09	60	50
7	Чусовая-Лямино	0,63	70	40	0,64	60	40
8	Сылва-Подкаменное (Сылвенск)	0,45	80	60	0,45	80	60

Примечание: $\delta_{доп}$ – допустимая погрешность расчета; P_1 – оправдываемость расчета по разработанной модели; P_2 – оправдываемость при выпуске расчета по средней величине.

Величина допустимой погрешности расчета ($\delta_{доп}$) для каждого пункта наблюдения не изменялась в зависимости от модели расчета и оставалась постоянной.

Оправдываемость расчета по модели с участием фактора осадков за период весеннего половодья ($\Sigma x_{весна}$) варьирует в пределах 60-90%. По среднему значению ряда оправдываемость P_2 ниже и составляет 40-70%. В модели без участия фактора осадков ($\Sigma x_{весна}$) выявлены аналогичные результаты. Оправдываемость расчета по модели выше, чем по средней величине. Так, P_1 изменяется от 60 до 90%, а P_2 в пределах 40-70%, что соответствует Наставлению... (1962).

Оправдываемость расчетов, выпущенных с использованием нормы ниже

оправдываемости по предлагаемым зависимостям, что свидетельствует об эффективности применения этих зависимостей в том случае, когда отсутствуют более надежные методики. Оправдываемость расчетов по модели с участием фактора осадков за период весеннего половодья ($\sum X_{весна}$) и модели без участия фактора осадков показали идентичные результаты. Поэтому, в практике оперативных расчетов, возможно, использовать модели без учета фактора осадков в весенний период.

Таблица 5.19

Ошибка расчета суммарного притока воды в Камское водохранилище на независимом материале 2011-2022 гг.

Годы	Ошибка расчета, млн куб. км	Ошибка расчета, %	Годы	Ошибка расчета, млн куб. км	Ошибка расчета, %
2011	-3,5	-13,5	2017	2,3	6,1
2012	1,2	4,9	2018	-3,5	-14,9
2013	0,9	3,3	2019	-2,1	-7,9
2014	0,2	0,5	2020	4,2	10,3
2015	-0,9	-2,9	2021	4,0	16,5
2016	1,2	3,5	2022	-2,7	-8,1
<i>Среднее значение за период 2011-2022</i>				0,1	-0,2

Расчет суммарного притока воды в Камское водохранилище, выполненный на независимом материале (табл. 5.19) показал, что ошибка в отдельные годы может составлять 13-17%, при этом средняя ошибка по модулю составляет 7%.

Оценка качества расчета объема стока воды для частных водосборов Камского водохранилища, выполненная на независимом материале (2011-2022 гг.) показала высокую оправдываемость. Таким образом, разработан алгоритм расчета, позволяющий на долгосрочную перспективу на основе анализа весеннего половодья и факторов его формирования оценить водность года. Оценка алгоритма по критериям S/σ и P показала удовлетворительное качество.

Выводы:

Разработан алгоритм расчета водности года на основе расчета притока воды в Камское водохранилище за период весеннего половодья, в основе которого лежит

анализ регрессионных моделей для восьми замыкающих створов рек. В ходе исследования построены и проанализированы зависимости множественной линейной регрессии объема стока воды от основных и косвенных факторов, влияющих на формирование весеннего половодья. Для каждого створа выбрана регрессионная модель с наилучшей теснотой связи и критериями качества. Оценка качества расчетов на независимом материале (2011-2022 гг.) показала высокую оправдываемость. Регрессионные модели для частных водосборов имеют хорошее качество и могут быть использованы для оперативных расчетов. Данные модели использованы для расчета суммарного притока воды в Камское водохранилище. Анализ сходимости результатов расчета суммарного притока воды показал, что средняя ошибка расчета по уравнению без осадков 1,6%, при этом ошибка расчета по методике, разработанной ГГИ (1977 г.) и используемой в Уральском УГМС выше (2,9%).

Таким образом, расчет позволяет на долгосрочную перспективу на основе анализа весеннего половодья и факторов его формирования оценить водность года в качественной и количественной форме. Оценка алгоритма по критериям S/σ и P показала удовлетворительное качество.

Выделены характерные значения объема притока воды в Камское водохранилище за период весеннего половодья для лет разной водности. Поскольку за период главной фазы водного режима на реках исследуемой территории формируется от 60% до 80% годового стока, зная пограничные значения объема стока воды за половодье и расчетные значения стока, можно определить какое по водности будет половодье и, соответственно, водность года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследования:

1. Разделение территории по преобладающему типу гидрографа обусловлено зональным характером распределения метеорологических факторов, которое определяет величину стока в характерные фазы водного режима. На территории водосбора Верхней и Средней Камы водохранилища наблюдаются три характерных типа гидрографа:

- 1-й тип – высокое продолжительное весеннее половодье и паводки в теплую часть года;
- 2-й тип – высокое весеннее половодье и незначительные или отсутствующие летне-осенние паводки;
- 3-й тип – невысокое весеннее половодье и значительные летне-осенние паводки.

2. Оценка гидрографов за средние и маловодные годы показала, что внутригодовое распределение стока рек водосбора соответствует типизации, предложенной на основе исследования ВГРС рек за многоводные годы. При этом были уточнены границы пространственного распределения типов гидрографов. Таким образом, используемый метод является справедливым при оценке внутригодового распределения стока рек.

3. В пределах водосбора выделены районы с однородными условиями формирования внутригодового распределения стока рек. В качестве критерия районирования использованы группы гидрографов с одинаковыми сроками начала, максимума, окончания весеннего половодья и летне-осенних дождевых паводков, а также значений доли их месячного стока в годовом.

Для проверки обоснованности выделения районов выполнено сравнение качества расчетов среднегодового объема воды на независимом материале по рекам-аналогам, выбранным с учетом схемы гидрологического районирования, показала, что ошибка вычислений искомой характеристики не превышает 9,8%.

4. Оценка долговременных циклов и фаз водности сезонного стока выявила, что момент начала выраженных изменений в гидрологических рядах в среднем на исследуемой территории в весенний период приходится на 1988–1989 гг., в летне-осенний и зимний сезоны на 1977 г. Сопоставление выявленных процентных соотношений сезонного стока до и после начала выраженных изменений дало возможность установить уменьшение стока в весенний сезон в среднем на 6,6 % и

значительное увеличение летне-осеннего (на 18 %) и зимнего (на 24 %) стока.

5. С увеличением площади водосбора, увеличивается естественная зарегулированность стока. Это увеличение наблюдается до определенных значений площади водосбора (8000–10000 км²). При дальнейшем увеличении площади коэффициент естественной зарегулированности стока меняется незначительно.

Доля стока за период весеннего половодья (IV-VI) тесно связана с естественной зарегулированностью стока. С увеличением естественной зарегулированности стока доля стока весеннего половодья уменьшается.

Наибольшее влияние естественной зарегулированности стока на формирование весеннего стока прослеживается на малых водосборах в многоводные и средние по водности годы, и на всей исследуемой территории в маловодные годы.

6. Основными факторами формирования стока весеннего половодья на реках водосбора являются максимальный запас воды в снеге перед началом снеготаяния и осадки в период весеннего половодья. Величина осеннего увлажнения и сумма среднесуточных положительных температур воздуха от даты перехода температуры воздуха через 0°C к положительным значениям до даты начала интенсивного подъема уровня воды оказывают косвенное влияние.

Анализ возможности комплексного учета всех исследуемых факторов на формирование стока весеннего половодья в виде $Y = f(S_{max} \cdot \sum x_{весна} \cdot U_{сен} \cdot \sum t_+)$ показал, что это не дает существенного увеличения тесноты связи. Наиболее высокие коэффициенты корреляции получены у зависимостей вида $Y = f(S_{max} \cdot \sum x_{весна})$.

7. На основе комплексного анализа ВГРС и главной фазы водного режима разработан алгоритм расчета водности. Проверка расчетов выполнена на независимом материале, показала, что в 90% случаев ошибки не превышают величину допустимой погрешности. Таким образом, полученный алгоритм расчета водности имеет удовлетворительное качество по критериям S/σ и P и может обеспечить потребителей необходимой информацией в период формирования весеннего половодья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиева А. Х. Построение гипсографической кривой водосбора реки Амур и внутригодового распределение стока // Вестник молодежной науки. – 2016. – № 5 (7). – С. 4.
2. Андреев В. Г. Внутригодовое распределение речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 327 с.
3. Антонов Н. Д. Изменчивость годового стока рек Европейской части СССР // Труды НИУ ГУ ГМС. – 1941. – Сер. IV, вып. 2.
4. Аполлов Б. А., Калинин Г. П., Комаров В. Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 420 с.
5. Апухтин А. В., Кумани М. В. Многолетняя динамика основных элементов весеннего стока малых и средних рек Центрального Черноземья // Региональные геосистемы. – 2015. – Т. 33, № 21 (218). – С. 114-120.
6. Бабкина И. В. Сезонное распределение годового стока на малых реках юга Среднесибирского региона // Вопросы географии Сибири. – 2006.
7. Балков В. А. Основные географические закономерности распределения весеннего стока рек Урала // Известия ВГО. – 1962. – Т. 94. – С. 321-324.
8. Баринов В. В. Внутригодовое распределение стока в пределах рек-левых притоков р. Белая // Геосфера. – 2019. – С. 178-180.
9. Барышев В. И. Внутригодовое распределение речного стока реки Большой Кизил // Фундаментальные и прикладные исследования в гидрометеорологии, водном хозяйстве и геоэкологии. – 2016. – С. 38-40.
10. Барышев В. И. Внутригодовое распределение речного стока реки Зилаир // Геосфера. – 2017. – С. 151-153.
11. Беляев Б. М., Варенцова Н. А. Разработка долгосрочных гидрологических прогнозов характеристик весеннего половодья на основе современной гидрометеорологической информации и методов её обработки // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии. – 2018. – С. 698-702.
12. Бефани Н. Ф., Калинин Г. П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. – 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Гидрометеиздат. – 1983. – 391 с.
13. Болгов М. В., Коробкина Е. А., Трубецкова М. Д., Филимонова М. К., Филиппова И. А. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волга // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 3. – С. 75-85.

14. Болгов М. В., Филиппова И. А. Об определении расчетных характеристик стока в условиях нарушения однородности временных рядов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2022. – № 5. – С. 7-17.
15. Болгов М. В., Филиппова И. А., Осипова Н. В., Коробкина Е. А., Трубецкова М. Д. Современные особенности гидрологического режима рек бассейна Волги // Вопросы географии. – 2018. – № 145. – С. 206-218.
16. Борщ С. В., Бураков Д. А., Симонов Ю. А. Методика оперативного расчета и прогноза суточного притока воды в водохранилище Зейской ГЭС // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – № 359. – С. 106-127.
17. Борщ С. В., Гельфан А. Н., Морейдо В. М., Мотовилов Ю. Г., Симонов Ю. А. Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище на основе гидрологической модели: результаты проверочных и оперативных испытаний // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2017. – № 366. – С. 68-86.
18. Борщ С. В., Семенова Н. К., Симонов Ю. А., Христофоров А. В. Методики краткосрочного прогнозирования стока рек бассейна Камы // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 3. – С. 127-143.
19. Борщ С. В., Симонов Ю. А., Христофоров А. В., Юмина Н. М. Прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 4. – С. 47-63.
20. Борщ С. В., Христофоров А. В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2015. – Спец. вып. 355. – 198 с.
21. Буковский М. Е., Семенова А. В., Чернова М. А. Анализ динамики климатических факторов, влияющих на формирование волны половодья на реках Окско–Донской низменности // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы. – 2019. – С. 348-355.
22. Бураков Д. А. Кривые добегаания и расчет гидрографа весеннего половодья. – Томск: Изд-во ТГУ, 1976. – 202 с.
23. Бураков Д. А. Основы гидрологических прогнозов объема и максимума весеннего половодья в лесной зоне Западно-Сибирской равнины // Вопросы географии Сибири. – 1978. – С. 3-49.

24. Бураков Д. А., Адамович А. А. Долгосрочные прогнозы притока воды в водохранилища Енисейских ГЭС с применением математической модели // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 1. – С. 95-105.
25. Бураков Д. А., Иванова О. И. Анализ формирования и прогноз стока весеннего половодья в лесных и лесостепных бассейнах рек Сибири // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 6. – С. 87-100.
26. Бураков Д. А., Космаков И. В. и др. Долгосрочный прогноз бокового притока воды в Красноярское водохранилище на II квартал. – 1991. – Вып. 94. – С. 65-81.
27. Бураков Д. А., Младенцева Л. А., Вахрушева С. Э., Адамович А. А. О результатах испытания методики краткосрочного и долгосрочного прогноза притока воды в Саяно-Шушенское водохранилище в период открытого русла // Информационный сборник № 30. Результаты испытания новых и усовершенствованных методов и моделей гидрометеорологических прогнозов. – М.: Гидрометцентр России, 2003. – С. 15-23.
28. Важнов А. Н. Средний многолетний сток рек Армянской ССР и его внутригодовое распределение. – Ереван: Изд-во Акад. наук Арм. ССР, 1956. – 155 с.
29. Валесян В. П. Исследование стока горных рек Армянской ССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 179 с.
30. Варенцова Н. А. Весенний сток рек Европейской территории России в условиях нестационарного климата: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 1.6.16. – М., 2025. – 28 с.
31. Варенцова Н. А., Киреева М. Б., Фролова Н. Л., Харламов М. А., Илич В. П., Сазонов А. А. Прогноз притока воды к Цимлянскому водохранилищу в период половодья в современных климатических условиях: проблемы и воспроизводимость // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47, № 6. – С. 694-709.
32. Варенцова Н. А., Киреева Н. Б., Харламов М. А., Варенцов М. И., Фролова Н. Л., Повалишников Е. С. Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. II. Переоценка с учетом современных условий на примере рек бассейна Дона // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 2. – С. 117-146.
33. Великанов М. А. Гидрология суши. 5-е изд. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 403 с.
34. Великанова Т. И. Весенний сток и особенности его формирования в условиях северной части Европейской территории СССР // Труды Центрального института прогнозов. – 1957. – № 54. – 7 с.

35. Вершинина Л. К., Крестовский О. И., Калюжный И. Л., Павлова К. К. и др. Оценка потерь талых вод и прогнозы объема стока половодья. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 189 с.
36. Виноградов Ю. Б. Математическое моделирование процессов формирования стока: опыт критического анализа. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 312 с.
37. Виноградова Л. И., Иванова О. И. Долгосрочный прогноз притока воды в Усть-Хантайское водохранилище в период летнего половодья // Астраханский вестник экологического образования. – 2021. – № 2. – С. 52-57.
38. Винокуров И. О. Внутригодовое распределение стока реки Печора в современных условиях // Природное и культурное наследие: междисциплинарные исследования, сохранение и развитие: кол. моногр. по материалам IV Междунар. науч.-практ. конф. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2016. – С. 79-81.
39. Винокуров И. О., Коротыгина У. Е. Современные изменения внутригодового распределения стока реки Северная Двина // Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра. – 2017. – С. 38-41.
40. Владимиров А. М. Гидрологические расчеты. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 365 с.
41. Владимиров А. М. Минимальный сток рек СССР. – Л.: Гидрометеорологическое издательство. – 1970. – 214 с.
42. Владимиров А. М. Факторы, определяющие возникновение экстремальных расходов и уровней воды половодья // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2009. – № 9. – С. 22-39.
43. Воейков А. И. Климаты земного шара, в особенности России. – СПб.: Издание Картографического заведения А. Ильина, 1884. – [2], VI, 640, III с.: 20 л. ил., карт.
44. Воскресенский К. П. Сток рек и временных водотоков на территории лесостепной и степной зон Европейской части СССР // Труды ГГИ. – 1951. – Вып. 29. – С. 1146.
45. Гареева Д. Р. Применение метода реального года при расчете внутригодового распределения стока на примере реки Сакмара // Вестник магистратуры. – 2017. – № 4-3. – 11 с.

46. Гареева Д. Р., Фатхутдинова Р. Ш. Внутригодовое распределение стока реки Малый Кизил (д. Муракаево) // Академия педагогических идей Новация. Серия: Студенческий научный вестник. – 2018. – № 1. – С. 126-132.
47. Гарцман Б. И. Оценка качества моделирования и прогнозирования в гидрологии – рассуждение о методе // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2023. – Т. 5, № 3. – С. 228-243.
48. Гарцман Б. И., Соколов О. В., Лупаков С. Ю. Возможности долгосрочного прогноза притока воды в Бурейское водохранилище // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2019. – Т. 1, № 3. – С. 426-449.
49. Гвоздецкий Н. А. Физико-географическое районирование СССР: характеристика региональных единиц. – 1968. – С. 118-155.
50. Гейнц Е. А. Об осадках, количестве снега и об испарении на речных бассейнах Европейской России // Труды экспедиции для исследования источников главнейших рек Европейской России. – СПб.: Типо-литогр. К. Биркендельфа, 1898. – 54 с.
51. Гельфан А. Н. Геостатистическое описание пространственного распределения снежного покрова в физико-математической модели снеготаяния на речном водосборе // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2021. – Т. 3, № 3. – С. 233-249.
52. Гельфан А. Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. – М.: Наука, 2007. – 280 с.
53. Гельфан А. Н., Морейдо В. М. Динамико-стохастическое моделирование формирования снежного покрова на Европейской территории России // Лёд и Снег. – 2014. – Т. 54, № 2. – С. 44-52.
54. Гельфан А. Н., Морейдо В. М. Описание макромасштабной структуры поля снежного покрова равнинной территории с помощью динамико-стохастической модели его формирования // Лёд и Снег. – 2015. – Т. 55, № 4. – С. 61-72.
55. Гельфан А. Н., Фролова Н. Л., Магрицкий Д. В., Киреева М. Б., Григорьев В. Ю., Мотовилов Ю. Г., Гусев Е. М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2021. – Т. 7, № 1. – С. 36-79.
56. Георгиади А. Г., Кашутина Е. А. Длительные периоды пониженного/повышенного стока на крупных реках России // CITES-2019, материалы Междунар. молодежной школы и конф. по вычислительно-

- информационным технологиям для наук об окружающей среде. – 2019. – С. 284-287.
57. Георгиади А. Г., Кашутина Е. А. Долговременные изменения стока крупнейших сибирских рек // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2016. – № 5. – С. 70-81.
 58. Георгиади А. Г., Кашутина Е. А. Многолетние изменения годового и сезонного стока рек бассейна Лены // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2015. – № 2. – С. 71-83.
 59. Георгиади А. Г., Коронкевич Н. И., Зайцева И. С., Кашутина Е. А., Барабанова Е. А. Климатические и антропогенные факторы в многолетних изменениях речного стока реки Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2013. – № 4. – С. 4-19.
 60. Георгиади А. Г., Милюкова И. П. Особенности долговременных фаз повышенной и пониженной водности Дона и Лены в XIX–XXI веках // Метеорология и гидрология. – 2023. – № 12. – С. 104-114.
 61. Георгиади А. Г., Милюкова И. П., Бородин О. О. Особенности многолетних изменений водности рек в бассейне Волги в XIX–XXI веках // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения : материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием. – Нижний Новгород, 2019. – С. 102-105.
 62. Георгиевский В. Ю. Изменения стока рек России и водного баланса Каспийского моря под влиянием хозяйственной деятельности и глобального потепления: дис. ... канд. геогр. наук. – СПб.: Гос. гидрологич. ин-т, 2005. – 39 с.
 63. Георгиевский В. Ю. Научно-прикладной справочник. Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы / под ред. В. Ю. Георгиевского. – Л., 2015. – 155 с.
 64. Георгиевский Ю. М., Шаночкин С. В. Гидрологические прогнозы: учебник. – СПб.: Изд-во РГГИК, 2007. – 436 с.
 65. Герасимова А. А., Нелюбина Е. А. Внутригодовое распределение стока реки Инструч // Балтийский морской форум. – 2019. – С. 320-325.
 66. Глушков В. Г. Вопросы теории и методы гидрологических исследований. Географо-гидрологический метод. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – С. 70-75.
 67. Горбунова К. А. Карст и пещеры Пермской области. – Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1992. – С. 70-75.

68. Гриневич А. Г., Емельянов Ю. Н., Шклянко О. В. Методика расчета лимитирующего гидрографа на основе многолетних данных о гидрологическом режиме. – 1998.
69. Давыдов Л. К., Дмитриева А. А., Конкина Н. Г. Общая гидрология. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 463 с.
70. Девяткова Т. П. Влияние атмосферной циркуляции на водность сезонов и межсезонное распределение стока рек Предуралья: автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Перм. гос. ун-т им. А. М. Горького. – Пермь, 1969. – 15 с.
71. Джамалов Р. Г., Сафронова Т. И., Телегина Е. А. Многолетняя квазипериодичность подземного и поверхностного стока рек России // Недропользование XXI век. – 2017. – № 5. – С. 98-105.
72. Дмитриева В. А. Внутригодовая и многолетняя динамика сезонного речного стока бассейна Верхнего Дона // Аридные экосистемы. – 2011. – Т. 17, № 2 (47). – С. 23-32.
73. Добровольский С. Г. Межгодовые и многолетние изменения стока рек мира // Водные ресурсы. – 2011. – Т. 38, № 6. – С. 643-660.
74. Добровольский С. Г. Оценка неопределённостей прогноза стока рек России и мира в XXI веке с учетом возможного антропогенного потепления // Научное обеспечение реализации "Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года". – 2015. – С. 142-148.
75. Долгов С. В. Антропогенные и климатические изменения водных ресурсов в Курской области и их последствия // Водные проблемы и их решение. – М.: Медиа-ПРЕСС, 2023. – С. 105-123.
76. Долгов С. В. Водный потенциал Волгоградской области и его современные изменения // Известия РАН. Серия географическая. – 2018. – № 4. – С. 77-88.
77. Домнин Д. А. Многолетние и внутригодовые изменения стока воды с российской части бассейна реки Западная Двина как отклик на колебания климатических параметров // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2018. – № 51. – С. 63-70.
78. Дубелир Г. Д., Корнеев Б. Г., Кудрявцев М. Н. Основы проектирования автомобильных дорог. – М.: Изд-во НАРКОМХОЗА РСФСР, 1938. – 228 с.
79. Евстигнеев В. М. Речной сток и гидрологические расчеты: учеб. для ун-тов по спец. «Гидрология». – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 154 с.

80. Жуков И. А., Айбулатов Д. Н. Тенденции изменения характеристик водного стока малых рек в бассейне Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2024. – № 6. – С. 22-37.
81. Загитова Л. Р. Оценка антропогенных изменений стока в бассейне р. Белой: дис. ... канд. геогр. наук. – Пермь: ПГУ, 2004. – 119 с.
82. Загитова Л. Р. Оценка влияния антропогенных факторов на годовой и сезонный сток в бассейне реки Белой // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2014. – № 5. – С. 119-126.
83. Зайков Б. Д. Средний сток и его распределение в году на территории СССР // Труды НИУ ГУГМС СССР. – 1946. – Сер. IV, вып. 24. – С. 67–95.
84. Зайцева И. С. Маловодные годы в бассейне Волги: природные и антропогенные факторы. – М.: ИГ АН СССР, 1990. – 184 с.
85. Зайцева И. С. Многолетние колебания стока Волги и глобальные изменения климата // Известия РАН. Серия географическая. – 1996. – № 5. – С. 45–54.
86. Зайцева И. С. Сравнительный анализ антропогенных воздействий на водные ресурсы России и США // Известия РАН. Серия географическая. – 2003. – № 4. – С. 77-85.
87. Зиновьев А. А. Анализ факторов, обуславливающих формирование весеннего половодья // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем : сб. материалов 50-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Минск, 24–28 марта 2014 г.). – Минск, 2014. – С. 128–129.
88. Змиева Е. С. Расчет притока воды к Куйбышевскому и Волгоградскому водохранилищам. – М.: Гидрометиздат, 1964. – 255 с.
89. Исаченко А. Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. – М: Высшая школа. – 1991. – 366 с.
90. Исмаилова Г. К. и др. Определение обеспеченности сезонного регулирования стока при комплексном использовании водных ресурсов // Гидрометеорология и экология. – 2007. – № 3. – С. 94-99.
91. Исмайылов Г. Х., Муращенкова Н. В. Исследование временных закономерностей речного стока бассейна Верхнего Дона // Природообустройство. – 2019. – № 1. – С. 35-40.
92. Калинин В. Г. Водный режим камских водохранилищ и рек их водосбора в зимний сезон. – Пермь: Изд-во Перм. гос. науч. исслед. ун-та, 2014. – 184 с.

93. Калинин В. Г., **Механошина Е. В.** О зависимостях стока весеннего половодья от основных факторов // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов : тр. VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Пермь, 30 мая – 2 июня 2019 г.). – 2019. – Т. 1. – С. 129-134.
94. Калинин В. Г., **Механошина Е. В.**, Богданова К. А. Внутригодовое распределение и естественная зарегулированность речного стока в многоводные и маловодные годы // Географические основы и экологические принципы региональной политики природопользования. – Иркутск, 2019. – С. 115-119.
95. Калинин В. Г., **Механошина Е. В.**, Богданова К. А. О пространственной неоднородности формирования стока весеннего половодья на реках водосбора Воткинского водохранилища // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития: тр. III Всерос. конф. – СПб.: Химиздат, 2019. – С. 426-429.
96. Калинин В. Г., **Механошина Е. В.**, Богданова К. А. Об изменениях внутригодового распределения стока на реках водосбора Воткинского водохранилища // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению: сб. докл. междунар. науч. конф. памяти Ю. Б. Виноградова. – СПб., 2020. – С. 665-668.
97. Калинин В. Г., **Механошина Е. В.**, Богданова К. А. Особенности внутригодового распределения стока рек водосбора Воткинского водохранилища в многоводные и маловодные годы // Гидрометеорология и экология: научные достижения и перспективы развития. – СПб., 2018. – С. 327-330.
98. Калинин В. Г., **Механошина Е. В.**, Пискарева К. И., Богданова К. А. Внутригодовое распределение речного стока в многоводные годы (на примере водосбора Воткинского водохранилища) // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии. – СПб., 2018. – С. 728-732.
99. Калинин В. Г., **Механошина Е.В.** Пространственные закономерности внутригодового распределения стока рек водосбора Воткинского водохранилища // Географический вестник. – 2024. – № 3 (70). – С. 49-58. – DOI: 10.17072/2079-7877-2024-3-49-58.
100. Калинин В. Г., Пьянков С. В. Применение геоинформационных технологий в гидрологических исследованиях. – Пермь: Перм. гос. ун-т, 2010. – 212 с.
101. Калинин В. Г., Суманеева К. И. Закономерности формирования внутригодового распределения стока рек водосбора Воткинского водохранилища в многоводные

- годы // VI Дружининские чтения : Всерос. конф. с междунар. участием (28–30 сентября 2016 г.). – Хабаровск, 2016. – С. 728-732.
102. Калинин В. Г., Суманеева К. И., **Механошина Е. В.** Гидрологическое районирование территории водосбора Воткинского водохранилища по внутригодовому распределению речного стока в многоводные годы // Вопросы географии. – 2018. – С. 325-336.
 103. Калинин В. Г., Чичагов В. В., Гырдымов Д. А. Многолетние колебания годового стока рек водосбора Верхней и Средней Камы // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». – 2023. – Т. 33, № 4. – С. 456-466.
 104. Калинин В. Г., Шайдулина А. А., Русаков В. С., Фасахов М. А. Математико-геоинформационное моделирование процесса снеготаяния на речных водосборах Прикамья // Лёд и Снег. – 2022. – Т. 62, № 1. – С. 63-74.
 105. Карамолдоев Ж. Ж., Калашникова О. Ю. Прогноз притока воды в Токтогульское водохранилище на вегетационный период // Вестник БГУ. – 2012. – № 3. – 23 с.
 106. Киреева М. Б., Фролова Н. Л. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2013. – № 1. – С. 60-76.
 107. Кисельников Е. П., Гордеев И. Н., Путинцев Л. А. Долгосрочный прогноз притока воды в Саяно-Шушенское водохранилище во втором квартале года // Прорывные научные исследования как двигатель науки: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Тюмень: ООО «Аэтерна», 2018. – Ч. 2. – 287 с.
 108. Клименко Д. Е., Корепанов Е. П. Максимальный сток рек Свердловской области. – 2014. – 245 с.
 109. Комаров В. Д. Весенний сток равнинных рек Европейской части СССР, условия его формирования и методы прогноза. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – 295 с.
 110. Комаров В. Д. О процессах формирования половодья на малой реке и предвычисления его гидрографа // Труды ЦИП. – 1947. – Вып. 6 (33). – С. 3-41.
 111. Комлев А. М. Закономерности формирования и методы расчетов речного стока. – Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2002. – 163 с.
 112. Коронкевич Н. И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. – М.: Наука, 1990. – 203 с.

113. Коронкевич Н. И., Барабанова Е. А., Зайцева И. С., Мельник К. С. Оценка влияния урбанизации на годовой сток и качество вод в мире и на континентах // Известия РАН. Серия географическая. – 2022. – Т. 86, № 3. – С. 470-480.
114. Коронкевич Н. И., Георгиади А. Г., Барабанова Е. А., Кашутина Е. А., Милюкова И. П. О соотношении климатических и антропогенных факторов в изменении стока Волги // Известия РАН. Серия географическая. – 2023. – Т. 87, № 6. – С. 825-834.
115. Коротаев Н. Я. Почвы Пермской области. – Пермь, 1962. – С. 17-24.
116. Кочерин Д. И. Низкие и наименьшие расходы воды на территории Европейской части СССР // Труды Московского института инженеров транспорта. – 1929. – Вып. 11. – С. 67-85.
117. Красов В. Д., Лысачев П. С. Применение моделированных последовательностей при оценке антропогенного воздействия на сток рек // Информатика: проблемы, методология, технологии. – 2009. – С. 375-378.
118. Краткий справочник для гидрологических расчетов на реках Западного Урала (Водосбор Воткинского водохранилища) / Перм. гос. ун-т им. А. М. Горького, Лаборатория водохоз. проблем. – Пермь, 1966. – С. 74-81.
119. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Расчеты речного стока. – Л.: Госстройиздат, 1934. – 259 с.
120. Кузин П. С. Классификация рек и гидрологическое районирование СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 456 с.
121. Кузин П. С., Бабкин В. И. Географические закономерности гидрологического режима рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 200 с.
122. Куприянов Е. А. Внутригодовое распределение водного стока правых притоков р. Томи – рек Мостовки, Камышки, Черной и Шишкобойки // Проблемы геологии и освоения недр. – 2013. – С. 441-443.
123. Кустов М. В., Комусова М. Н. Внутригодовое распределение стока реки Мокша // Достижения современной науки. – 2016. – С. 437-448.
124. Кучмент Л. С., Гельфан А. Н. Динамико-стохастические модели формирования речного стока. – М.: Наука, 1993. – 104 с.
125. Кучмент Л. С., Гельфан А. Н. Исследование эффективности ансамблевых долгосрочных прогнозов весеннего половодья, основанных на физико-математических моделях формирования речного стока // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 2. – С. 54-67.

126. Кучмент Л. С., Демидов В. Н., Мотовилов Ю. Г. Формирование речного стока. Физико-математические модели. – М.: Наука, 1983. – 216 с.
127. Лавров С. А. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги / С. А. Лавров, И. Л. Калужный // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2016. – № 6. – С. 42-60.
128. Лебедева Л. С. Современные изменения стока в бассейне реки Яна // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2022. – № 6. – С. 86-106.
129. Лебедева Н. Д. Долгосрочные прогнозы притока воды в водохранилище Камской ГЭС // Труды ЦИП. – Москва: Гидрометеиздат, 1967. – Вып. 155. – С. 89-102.
130. Лебедева Н. Д. Расчет снеготаяния и метод краткосрочного прогноза даты наступления максимального уровня половодья на р. Каме // Труды ЦИП. – М: Гидрометеиздат, 1959. – Вып. 94. – С. 15-33.
131. Лепихин А. П. Структура временной изменчивости годового стока рек бассейна р. Камы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2005. – Т. 7, № 3. – С. 277-295.
132. Лешан И. Ю. Внутригодовое распределение речного стока реки Ай в створе д. Метели / И. Ю. Лешан, К. Д. Силантьев // Аллея науки. – 2018. – Т. 1, № 4. – С. 507-512.
133. Лившиц И. М. Сезонное и месячное распределение стока на территории Полесья // Труды Ин-та мелиорации, водного и болотного хоз-ва АН БССР. – 1955. – Т. 6. – С. 78-95.
134. Лопух П. С. Влияние атмосферной циркуляции на формирование гидрологического режима рек Беларуси / П. С. Лопух, И. С. Данилович. – Минск: БГУ, 2013. – С. 216-218.
135. Лукьянович М. А. Генетическая и сезонная структуры речного стока континентов // География и природные ресурсы. – 2011. – № 3. – С. 125-133.
136. Лурье П. М. Влияние изменений климата на гидрологический режим р. Дон в начале XXI столетия / П. М. Лурье, В. Д. Панов // Метеорология и гидрология. – 1999. – № 4. – С. 90-97.
137. Львович М. И. Опыт классификации рек СССР // Труды ГГИ. – 1938. – Вып. 6. – 252 с.

138. Львович М. И. Человек и воды: Преобразование водного баланса и речного стока. – Москва: Географгиз, 1963. – 568 с.
139. Магрицкий Д. В. Закономерности, характеристики и причины изменчивости годового и сезонного стока воды рек в бассейне р. Урал / Д. В. Магрицкий, А. Ж. Кенжебаева // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2017. – № 3. – С. 39-61.
140. Магрицкий Д. В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты на нижней Лене и Вилюе // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2015. – № 6. – С. 85-95.
141. Макаревич А. А., Яротов А. Е. Речной сток и русловые процессы: учебное пособие. – Минск: БГУ, 2019. – 115 с.
142. Макарычев С. В. Регулирование внутригодового перераспределения стока р. Алей попусками из Гилевского водохранилища / С. В. Макарычев, В. В. Мешков, А. А. Томаровский // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 1 (99). – С. 33-38.
143. Марчик Т. П. Почвоведение с основами растениеводства / Т. П. Марчик, А. Л. Ефремов. – Гродно: ГрГУ, 2006. – 249 с.
144. Матарзин Ю. М. Водосбор и сток рек, питающих Камское водохранилище // Камское водохранилище. – Пермь: Пермское книжное издательство, 1959. – 159 с.
145. Матарзин Ю. М. Гидрография / Ю. М. Матарзин, А. С. Шкляев // Пермская область. – Пермь: Пермское книжное издательство, 1959. – С. 26-40.
146. **Механошина Е. В.** Анализ продолжительности весеннего половодья на реках водосбора Воткинского водохранилища за многолетний период / Е. В. Механошина, Т. С. Никитина // Географическое изучение территориальных систем. – 2022. – С. 96-100.
147. **Механошина Е.В.,** Микова К.Д., Ширинкина М.В. Анализ многолетних изменений модуля стока на территории рек водосбора Воткинского водохранилища // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды X Всерос. науч.-практ. конф. с междунар.участ. – Пермь. 2025. – С. 171-176.
148. **Механошина Е. В.** О роли естественной зарегулированности речного стока в формировании его внутригодового распределения в многоводные годы // Вопросы гидрологии, геоэкологии и охраны водных объектов. – Пермь, 2018. – С. 53-58.

149. **Механошина Е. В.** О формировании стока весеннего половодья в многоводные годы // Вопросы гидрологии, геоэкологии и охраны водных объектов. – Пермь, 2018. – С. 59-64.
150. **Механошина Е. В.,** Микова К. Д. Оценка многолетнего изменения сезонного стока рек водосбора Воткинского водохранилища // Региональные геосистемы. – 2025. – Т. 49. – №. 4. – С. 669-683.
151. **Механошина Е. В.,** Микова К. Д., Калинин В. Г. Прогноз характеристик весеннего половодья для рек водосбора Камского водохранилища // Комплексные исследования водохранилищ и их водосборов : сборник научных трудов, посвященный 100-летию со дня рождения Ю. М. Матарзина. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2024. – С. 73-81.
152. **Механошина Е. В.,** Микова К. Д., Никитина Т. С., Калинин В. Г. Особенности формирования весеннего половодья на реках водосбора Воткинского водохранилища // Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Науки о Земле. – 2025. – Т. 35, № 1. – С. 81-91. – DOI:10.35634/2412-9518-2025-35-1-81-91.
153. **Механошина Е. В.,** Никитина Т. С. Многолетние колебания продолжительности весеннего половодья на реках водосбора Воткинского водохранилища // Вопросы гидрологии, геоэкологии и охраны водных объектов. – Пермь, 2023. – С. 16-21.
154. Микова К.Д., **Механошина Е.В.** Анализ изменения притока воды в Камское водохранилище в многолетнем разрезе // Шестые Виноградовские чтения. Гидрология нового поколения: Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. – Санкт-Петербург, 2026. – С. 536-540.
155. Микова К. Д., **Механошина Е. В.,** Ромашова Р. Н., Колегов М. В. Многолетнее изменение притока воды в Камское водохранилище // Географический вестник. – 2026. – № 1 (76). – С. 86-98. – DOI: 10.17072/2079-7877-2026-1-86-98.
156. Миннегалиев А. О. Зависимости средней продолжительности весеннего половодья от морфометрических характеристик водосборов (на примере бассейна р. Белой) // Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Науки о Земле. – 2018. – Т. 28, вып. 4. – С. 427-433.

157. Михайлов В. Н. Общая гидрология / В. Н. Михайлов, А. Д. Добровольский. – Москва: Высшая школа, 1991. – 368 с.
158. Мордовин А. М. Годовой и сезонный сток рек бассейна Амура. – 1996. – 72 с.
159. Морейдо В. М. Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего половодья и летней межени на основе динамико-стохастической модели формирования речного стока // Научное обеспечение реализации Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года. – 2015. – С. 180-186.
160. Морейдо В. М. Оценка предсказуемости притока воды в Чебоксарское водохранилище с помощью численных экспериментов // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. – 2017. – С. 241-247.
161. Морейдо В. М. Прогноз сезонного речного стока в детерминированной и вероятностной формах / В. М. Морейдо, Б. И. Гарцман // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. – 2023. – С. 148-152.
162. Мотовилов Ю. Г. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов / Ю. Г. Мотовилов, А. Н. Гельфан. – Москва: Издательство РАН, 2018. – 300 с.
163. Мотовилов Ю. Г. Моделирование снежного покрова и снеготаяния // Моделирование гидрологического цикла речных водосборов / под ред. Л. С. Кучмента, Е. Л. Музылева. – Москва: Издательство Национального геофизического комитета РАН, 1993. – С. 9-37.
164. Назаренко О. В. Влияние климатических изменений на сток реки Дон // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. – 2020. – С. 728-732.
165. Назаров Н. Н. География Пермского края. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2006. – С. 138.
166. Наливкин В. Д. Стратиграфия и тектоника Уфимского плато и Юрюзано-Сылвенской депрессии. – Ленинград: Гостоптехиздат, 1949. – 128 с.
167. Нарожный Ю. К. Особенности внутригодового распределения стока рек Алтая / Ю. К. Нарожный, В. В. Паромов, Л. Н. Шантыкова // Материалы гляциологических исследований. – 1998. – № 84. – С. 34-40.
168. Наставление по службе прогнозов. Раздел 1. Служба гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 193 с. 2 л. граф.

169. Наумов В. А. Внутригодовое распределение стока рек Калининградской области в 2020 году // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2022. – Т. 8, № 3. – С. 35-44.
170. Никитин С. Н. Основы инженерной гидрологии рек. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1952. – 231 с.
171. Николаев В. А. Проблемы регионального ландшафтоведения. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 160 с.
172. Николаев С. Ф. Растительность // Пермская область. – Пермь: Пермское книжное издательство, 1959. – С. 103-127.
173. Ноговицын Д. Д. Географо-гидрологическое районирование и внутригодовое распределение стока реки Виллой в естественных и зарегулированных условиях // Энергетика Якутской АССР. – 1974. – С. 148-159.
174. Овсянникова А. А. Расчет внутригодового распределения стока ранговым методом / А. А. Овсянникова, А. В. Сикан // Гидрология и океанология. – 2023. – С. 88-97.
175. Огиевский А. В. Гидрология суши (общая и инженерная). – Москва: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1952. – 515 с.
176. Ольдекоп Э. М. Об испарении с поверхности речных бассейнов // Труды Юрьевской обсерватории. – 1911. – С. 12-24.
177. Оппоков Е. В. Колебания водоносности рек в историческое время // Исследования рек СССР. – Ленинград: Издание ГГИ, 1933. – № 4. – С. 109-128.
178. Оппоков Е. В. О водоносности рек в связи с атмосферными осадками и другими факторами стока // Записки Русского географического общества по общей географии. – Санкт-Петербург: Академия Наук, 1911. – С. 234-286.
179. Ортбаева А. У. Оценка изменения водного режима р. Есиль // Гидрометеорология и экология. – 2005. – № 2. – С. 120-126.
180. Островский Г. М. О густоте речной сети Среднего Урала и Приуралья // Ученые записки Пермского университета. – 1966. – № 146. – С. 50-54.
181. Переладова Л. В. Максимальный весенний сток рек Тюменской области: автореферат диссертации ... кандидата географических наук: 11.00.07. – Пермь, 2000. – 20 с.
182. Перминов А. В. Оценка внутригодового распределения речного стока в бассейне Верхней Волги / А. В. Перминов, М. А. Смирнова // Агроинженерия. – 2014. – № 3. – С. 30-34.

183. Петров А. И. Внутригодовое распределение стока рек бассейна р. Васюган. Климатология и гляциология Сибири. Международная научная конференция, Томск. – 2015. – С. 334-336.
184. Полонский В. Ф. Многолетние и внутригодовые изменения стока и уровней воды в дельте Волги / В. Ф. Полонский, Л. П. Остроумова // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 2. – С. 63-72.
185. Поляков Б. В. Гидрологический анализ и расчеты. – Л: Гидрометеиздат, 1946. – 246 с.
186. Попов Е. Г. Основы гидрологических прогнозов. – Л: Гидрометеиздат, 1968. – 294 с.
187. Правила использования водных ресурсов Камского и Воткинского водохранилищ на р. Каме / Федеральное агентство водных ресурсов. – 2016. – 202 с.
188. Протодьяконов М. М. Определение максимального стока поверхностных вод с малых водосборов. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1960. – 171 с.
189. Пряхина Г. В. и др. Оценка изменения характеристик стока малых и средних рек Центральной Якутии под влиянием климатических изменений // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2023. – Т. 68. – №. 4. – С. 717-732.
190. Пьянков С. В. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений: монография / С. В. Пьянков, А. Н. Шихов. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2017. – 148 с.
191. Пьянков С. В. Гидрография. Создание цифровых моделей рельефа для определения гидрографических характеристик рек и их водосборов / С. В. Пьянков, В. Г. Калинин. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2014. – Ч. 1. – 63 с.
192. Пьянков С. В. Моделирование снегонакопления и снеготаяния в бассейне р. Кама с применением данных глобальных моделей прогноза погоды / С. В. Пьянков, А. Н. Шихов, П. Г. Михайлюкова // Лёд и Снег. – 2019. – Т. 59, № 4. – С. 494-508.
193. Раткович Д. Я. Условные распределения вероятностей внутригодовых колебаний стока рек снегового питания / Д. Я. Раткович, М. В. Болгов // Водные ресурсы. – 1996. – Т. 23, № 3. – С. 261-266.

194. Ресурсы поверхностных вод СССР. Средний Урал и Приуралье. Кама. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – Т. 11, вып. 1. – 420 с.
195. Решетникова Л. К. Внутригодовое распределение стока на примере реки Оскол / Л. К. Решетникова, М. Г. Лебедева, М. А. Петина // Региональные геосистемы. – 2010. – Т. 11, № 9 (80). – С. 137-142.
196. Рождественский А. В. Пространственно-временные колебания стока рек СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 375 с.
197. Рязанцев В. К. Формирование половодья малых равнинных водотоков / В. К. Рязанцев, В. Н. Жердев. – Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1991. – 180 с.
198. Самойлова С. Ю. Оценка стационарности годового и сезонного стока рек бассейна Верхней Оби / С. Ю. Самойлова, О. В. Ловцкая, А. Б. Голубева // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2024. – № 5. – С. 21-38.
199. Сванидзе Г. Г. Моделирование гидрологических рядов с учетом внутригодового распределения стока (метод фрагментов) // Доклады гидрологической конференции ЧССР. – Братислава, 1962. – С. 411-418.
200. Семенова А. В., Буковский М. Е. Зависимость пика весеннего половодья в верховьях реки Цны от климатических факторов // Географический вестник. – 2022. – № 1 (60). – С. 87-99.
201. Сенчуков Г. А. Прогнозирование внутригодового распределения стока на реке Каче с использованием различных расчетных методов / Г. А. Сенчуков [и др.] // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2018. – № 4. – С. 42-48.
202. Серпик Б. И. Выбор и обоснование методики расчета максимального стока при региональных обобщениях: автореферат диссертации ... кандидата технических наук. – Ленинград: Государственный гидрологический институт, 1971. – 34 с.
203. Сивохиц Ж. Т. Современные тенденции внутригодового распределения речного стока в бассейне реки Урал / Ж. Т. Сивохиц, В. М. Павлейчик // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2020. – Т. 33. – С. 112-123.
204. Симонов Ю. А. Методика краткосрочных прогнозов расходов воды на реках бассейна Камы на основе использования модели HBV / Ю. А. Симонов, Н. К.

- Семенова, А. В. Христофоров // Метеорология и гидрология. – 2021. – № 6. – С. 55-65.
205. Симонов Ю. А. Оценка применимости модели динамики снежного покрова SNOW-17 в практике оперативного гидрологического прогнозирования в России / Ю. А. Симонов, Э. Л. Д. Ликарь, Н. Л. Фролова // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2016. – № 360. – С. 95-112.
206. Соколовский Д. Л. Обзор исследований по вопросам речного стока и методики его расчетов // Труды НИУ ГУ ГМС. – 1946. – Сер. IV, вып. 39.
207. Соколовский Д. Л. Речной сток. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1968. – 539 с.
208. Софроницкий П. А. Геологическое строение // Пермская область. – Пермь, 1959. – С. 19-29.
209. СП 529.1325800.2023. Определение основных расчётных гидрологических характеристик: свод правил: утверждён и введён в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 11 сентября 2023 г. № 654/пр : дата введения 2023-10-12. – М. : Минстрой России, 2023.
210. Спирин Ю. А. Анализ внутригодового распределения стока рек Славского района Калининградской области // Региональные геосистемы. – 2020. – Т. 44, № 2. – С. 231-242.
211. Срибный М. Ф. Расчет максимального ливневого стока // Максимальный сток с малых бассейнов: сборник. – М.: Трансжелдориздат, 1940. – 384 с.
212. Сумачев А. Э. и др. Гидрологический режим рек Ростовской области в условиях изменения климата / А. Э. Сумачев, И. С. Смекалин, Д. А. Кузнецов, В. Н. Михайлов // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2024. – № 6. – С. 91-105.
213. Троицкий В. А. Гидрологическое районирование СССР // Труды Комиссии по естественно-историческому районированию СССР. – Москва; Ленинград, 1948. – Т. 2, вып. 3.
214. Уржунцева В. Н. Анализ факторов, влияющих на величину весеннего половодья на реках Тюменской области в 2017 году / В. Н. Уржунцева, С. А. Гужеева // Вестник научных конференций. – 2017. – № 5-1. – С. 112-114.
215. Урываев В. А. Обеспеченность расходов в году рек Европейской части СССР // Труды НИУ ГУГМС. Сер. 4. – 1941. – Вып. 2. – С. 53-71.

216. Ушаков М. В. Влияние климатических изменений на внутригодовое распределение стока Верхней Колымы // Общество. Среда. Развитие. – 2021. – С. 86.
217. Физико-географическое районирование. – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Изд-во МГУ. –1981. – 127 с.
218. Фомичева А. А. Влияние изменений климата на внутригодовое распределение стока рек бассейна Верхней Волги / А. А. Фомичева, А. В. Сикан // Гидрология и океанология – 2023.– С. 140-147.
219. Фролова Н. Л. Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории России и его изменение / Н. Л. Фролова [и др.] // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2015. – № 4. – С. 4-20.
220. Фролова Н. Л. Внутригодовое распределение стока рек России / Н. Л. Фролова, Д. П. Нестеренко, Н. В. Шенберг // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2010. – № 6. – С. 8-16.
221. Фролова Н. Л. Гидрология рек. Антропогенные изменения речного стока: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2020. – 115 с.
222. Фролова Н. Л. Естественная зарегулированность стока рек бассейна Волги в условиях меняющегося климата / Н. Л. Фролова, С. А. Агафонова, Д. П. Нестеренко, Е. С. Повалишникова // Водное хозяйство России. – 2013. – № 6. – С. 32-49.
223. Фролова Н. Л. Современные особенности внутригодового распределения стока рек бассейна Волги / Н. Л. Фролова [и др.] // Речной сток: пространственно-временная изменчивость и опасные гидрологические явления. – Москва: Географический факультет МГУ, 2014. – С. 61-82.
224. Фролова Н. Л., Повалишникова Е. С., Киреева М. Б. Классификация и районирование рек по водному режиму: история, методология, перспективы // Водные ресурсы. – 2021. – Т. 48, № 2. – С. 121-134.
225. Харшан А. А. Долгосрочные прогнозы стока горных рек Сибири // Труды Гидрометцентра СССР. – 1970. – Вып. 65. – 210 с.
226. Чеботарев А. И. Гидрологический словарь. – Л: Гидрометеиздат, 1978. – 308 с.
227. Чеботарев А. И. Общая гидрология. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. – 544 с.
228. Чигринец А. Г. Оценка характеристик стока весеннего половодья равнинных рек Казахстана на примере бассейна р. Есиль / А. Г. Чигринец, Д. Д. Арыстамбекова // Гидрометеорология и экология. – 2017. – № 1 (84). –С. 62-74.

229. Швец Г. И. Распределение стока рек УССР по сезонам и месяцам: дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00. – Киев, 1946. – 207 с.
230. Шевелев М. Э. Метод расчета обеспеченных минимумов речного стока // Метеорология и гидрология. – 1937. – № 8. – С. 31-39.
231. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю. Современные и перспективные изменения стока рек России под влиянием климатических факторов // Водные ресурсы суши в условиях изменяющегося климата. – СПб.: Наука, 2007. – С. 20-32.
232. Шульц В. Л. Реки Средней Азии. – Москва: Географгиз, 1949. – 199 с.
233. Юмина Н. М. Многолетние изменения стока рек бассейна Вилюя / Н. М. Юмина, М. А. Терешина // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2017. – № 6. – С. 62-70.
234. Юмина Н. М. Оценка климатического и антропогенного вкладов в многолетние колебания сезонного стока рек бассейна реки Урал / Н. М. Юмина, Д. В. Магрицкий // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2024. – Т. 391, № 1. – С. 135-151.
235. Яковченко С. Г. Создание геоинформационных систем в инженерной гидрологии: диссертация ... кандидата технических наук. – [Место защиты: Институт угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук], 2007. – 43с.
236. Aizen V. B., Aizen E. M., Melack J. M. Climate and hydrologic changes in Central Asia // *Water*. – 2021. – Vol. 13. – No. 1. – Article 95. – DOI: 10.3390/w13010095
237. Alkhadher S., et al. Seasonal runoff dynamics and water quality in tropical reservoirs // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – Article 9808. – DOI: 10.1038/s41598-025-09808-z
238. Allchin M. Characterisation and Classification of Hydrological Catchments in Alberta, Canada Using Growing Self-Organising Maps // Proc. 23rd GIS Res. UK (GISRUK) Conf Univ. Leeds. – 2015. – P. 55-63. – DOI: 10.6084/m9.figshare.1491375.
239. Aschwanden H. Die Abflussregimes der Schweiz / H. Aschwanden, R. Weingartner. – Bern: Geographisches Ins. Univ. Bern, Publ. Gewässerkunde. – 1985. – V. 65. – 237 p.
240. Barth N. A., Wavra H. N., Koebele A. R., Sando S. K. Changes in streamflow seasonality associated with hydroclimatic variability in the north-central United States among three discrete temporal periods, 1946–2020 // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – 2025. – Vol. 57. – Art. no. 102084. – 28 p. – DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.102084.

241. Beldring S., Engeland K., Roald L. A. Climate change impacts on seasonal runoff in Norway // *Hydrology Research*. – 2021. – Vol. 52. – No. 4. – P. 789-805. – DOI: 10.2166/nh.2021.019
242. Berghuijs W. R., Woods R. A., Hrachowitz M. A precipitation shift from snow towards rain leads to a decrease in streamflow // *Nature Climate Change*. – 2014. – Vol. 4. – P. 583-586. – DOI: 10.1038/nclimate2246
243. Berhanu B. B. Flow Regime Classification and Hydrological Characterization: A Case Study of Ethiopian Rivers / B. B. Berhanu, Y. Seleshi, S. S. Demisse, A. M. Melesse // *Water*. – 2015. – V. 7. – P. 3149-3165. – DOI: 10.3390/w7063149.
244. Blöschl G. Changing climate both increases and decreases European river floods / G. Blöschl, J. Hall, A. Viglione et al. // *Nature*. – 2019. – № 573. – P. 108-111. – DOI: 10.1038/s41586-019-1495-6.
245. Bolgov M. V. Nonstationary stochastic autoregression model of hydrological processes with seasonal variation // *Water Resources*. – 1996. – Vol. 23, No. 1. – P. 17-22.
246. Bolgov M. V. Stochastic models of periodically correlated annual variations of river runoff // *Russian Meteorology and Hydrology*. – 1996. – № 1. – С. 101-116.
247. Dallaire C. O. A multidisciplinary framework to derive global river reach classifications at high spatial resolution / C. O. Dallaire, B. Lehner, R. Sayre, M. Thieme // *Environ. Res. Lett.* – 2019. – V. 14, № 2. – 024003. – DOI: 10.1088/1748-9326/aad8e9.
248. Dung N. B. Weights of factors contributing to flood formation in the Lam River Basin, Vietnam / N. B. Dung, D. T. Minh, N. Q. Long, L. T. T. Ha // *Journal of Southwest Jiaotong University*. – 2020. – Vol. 55. – № 2.
249. Finlayson B. L. Australia vs. the World: a comparative analysis of stream flow characteristics / B. L. Finlayson, T. A. McMahon // *Fluvial Geomorphology of Australia* / ed. R. F. Werner. – Sydney: Acad. Press. – 1988. – P. 17-40.
250. Gharari S. Hydrological landscape classification: investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment / S. Gharari, M. Hrachowitz, F. Fenicia, H. H. G. Savenije // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* – 2011. – V. 15. – P. 3275-3291. – DOI: 10.5194/hess-15-3275-2011.
251. GloRiC Version 1.0 [Электронный ресурс]. – URL: www.hydrosheds.org/page/gloric (дата обращения: 10.03.2025).
252. Han J., Liu Z., Woods R., McVicar T. R., Yang D., Wang T., Hou Y., Guo Y., Li C., Yang Y. Streamflow seasonality in a snow-dwindling world // *Nature*. – 2024. – Vol. 629. – P. 1075-1081. DOI: 10.1038/s41586-024-07299-y.

253. Hanus S., Parajka J., Viglione A., et al. Changes in seasonal runoff in European Alps under climate change // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2021. – Vol. 25. – P. 3429-3445. – DOI: 10.5194/hess-25-3429-2021
254. Hasson S., Lucarini V., Pascale S. Hydrological cycle over South Asia under climate change // *Earth System Dynamics*. – 2013. – Vol. 4. – P. 199-217. – DOI: 10.5194/esd4-199-2013
255. He M., Russo M., Anderson M. Predictability of seasonal streamflow in a changing climate in the Sierra Nevada // *Climate*. – 2016. – Vol. 4, no. 4. – Art. 57. – DOI: 10.3390/cli4040057.
256. Hydrology: A Science of Nature / eds A. Musy, C. Higy. – Boca Raton: Taylor & Francis Group. CRC Press. – 2010. – 346 p. – DOI: 10.1201/b10426.
257. Ji X., et al. Seasonal runoff variability and extremes in Australian river basins // *Discover Water*. – 2025. – Vol. 5. – Article 20. – DOI: 10.1007/s43832-025-00200-6
258. Ji X., Li Y., Luo Y. Impacts of climate and land use on seasonal runoff in the Yellow River Basin // *Land*. – 2021. – Vol. 10. – No. 5. – Article 542. – DOI: 10.3390/land10050542
259. Kalinin V. G. Analysis of the dependencies of spring flood runoff from the main factors / V. G. Kalinin, **E. V. Mekhanoshina** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Perm: Institute of Physics Publishing. – 2019. – P. 012029. – DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012029.
260. Kalinin V. G. Changes in the annual and intra-annual river runoff of the Votkinsk reservoir's catchment / V. G. Kalinin, D. A. Gyrdymov, **E. V. Mekhanoshina** // Modern problems of reservoirs and their catchments. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 834 012029 (2021) IOP Publishing. – DOI: 10.1088/1755-1315/834/1/012029.
261. Kennard M. J. Classification of natural flow regimes in Australia to support environmental flow management / M. J. Kennard, B. J. Pusey, J. D. Olden [et al.] // *Freshwater Biol.* – 2010. – V. 55. – P. 171-193. – DOI: 10.1111/j.1365-2427.2009.02307.
262. Kuentz A. Understanding hydrologic variability across Europe through catchment classification / A. Kuentz, B. Arheimer, Y. Hundecha, T. Wagener // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* – 2017. – V. 21. – P. 2863-2879. – DOI: 10.5194/hess-21-2863-2017.
263. Lane B. A. Revealing the Diversity of Natural Hydrologic Regimes in California with Relevance for Environmental Flows Applications / B. A. Lane, H. E. Dahlke, G. B. Pasternack, S. SandovalSolis // *JAWRA*. – 2016. – P. 1-20. – DOI: 10.1111/1752-1688.12504.
264. Lu E. Determining the start, duration, and strength of flood and drought with daily precipitation: Rationale // *Geophysical research letters*. – 2009. – Vol. 36, № 12. – DOI: 10.1029/2009GL038817.

265. Mackay S. J. Classification and comparison of natural and altered flow regimes to support an Australian trial of the Ecological Limits of Hydrologic Alteration framework / S. J. Mackay, A. H. Arthington, C. S. James // *Ecohydrol.* – 2014. – V.7, Iss. 6. – P. 1485-1507. – DOI: 10.1002/eco.1473.
266. Matti B. Flood seasonality across Scandinavia – Evidence of a shifting hydrograph? / B. Matti, H. E. Dahlke, B. Dieppois, D. M. Lawler, S. W. Lyon // *Hydrol. Processes.* – 2017. – V. 31, Is. 24. – P. 4354-4370. – DOI: 10.1002/hyp.11365.
267. McManamay R. A. A regional classification of unregulated stream flows: spatial resolution and hierarchical frameworks / R. A. McManamay, D. J. Orth, C. A. Dolloff, E. A. Frimpong // *River Res. Applic.* – 2011. – V. 28, Iss. 7. – P. 1019-1033. – DOI: 10.1002/rra.1493.
268. Merz B. Spatial coherence of flood-rich and flood-poor periods across Germany / B. Merz, N. V. Dung, H. Apel [et al.] // *J. Hydrol.* – 2018. – V. 559. – P. 813-826. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.02.082.
269. Moriasi D. N. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria / D. N. Moriasi, M. W. Gitau, N. Pai, P. Daggupati // *Transactions of the ASABE.* – 2015. – Vol. 58, № 6. – C. 1763-1785.
270. Najibi N. Recent trends in the frequency and duration of global floods / N. Najibi, N. Devineni // *Earth System Dynamics.* – 2018. – Vol. 9, № 2. – C. 757-783.
271. Natural Resources Canada [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/resources/maps>.
272. Peel M. C., McMahon T. A., Finlayson B. L. Hydrological regimes and seasonal runoff variability in Australia // *Journal of Hydrology.* – 2004. – Vol. 288. – P. 32-52. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.10.012
273. Penna D., Tromp-van Meerveld H. J., Gobbi A., et al. Seasonal changes in runoff generation in a small forested mountain catchment // *Journal of Hydrology.* – 2014. – Vol. 519. – P. 2027-2042. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.040
274. Poff N. Implications of Streamflow Variability and Predictability for Lotic Community Structure: A Regional Analysis of Streamflow Patterns / N. Poff, V. Ward // *Can. J. Fisheries and Aquatic Sci.* – 1989. – V. 46. – P. 1805-1817. – DOI: 10.1139/f89-228.
275. Rasul G., Chaudhry Q. Z., Mahmood A. Seasonal variability of runoff and water quality in cold regions // *Water, Air, & Soil Pollution.* – 2018. – Vol. 229. – Article 354. – DOI: 10.1007/s11270-018-4008-6

276. Rood S. B., Pan J., Gill K. M., Franks C. G., Samuelson G. M., Shepherd A. Declining summer flows of Rocky Mountain rivers: changing seasonal hydrology and probable impacts on floodplain forests // *Journal of Hydrology*. – 2008. – Vol. 349, – iss. 3–4. – P. 397-410. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.11.012.
277. Salo T., Koivusalo H., Lauren A. Seasonal effects of controlled drainage on field water balance and groundwater levels // *Agricultural Water Management*. – 2021. – Vol. 256. – Article 107084. – DOI: 10.1016/j.agwat.2021.107084
278. Sanborn S. C. Predicting streamflow regime metrics for ungauged streams in Colorado, Washington, and Oregon / S. C. Sanborn, B. P. Bledsoe // *J. Hydrol.* – 2006. – V. 325. – P. 241-261. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.10.018.
279. Sawicz K. Catchment classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA / K. Sawicz, T. Wagener, M. Sivapalan [et al.] // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* – 2011. – V. 15. – P. 241-261. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.10.018.
280. Yeste P., et al. Climate change impacts on seasonal runoff in the Duero basin // *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. – 2024. – P. 1-25. – DOI: 10.5194/hess 2024 XX
281. Yokoo Y., Sivapalan M., Oki T. Investigating the roles of climate seasonality and landscape characteristics on runoff // *Water Resources Research*. – 2009. – Vol. 45. – W06415. – DOI: 10.1029/2008WR007379
282. Wasko C., Sharma A., Johnson F. et al. Global changes in streamflow timing and seasonality under climate warming // *Journal of Hydrology*. – 2022. – Vol. 607. – Art. no. 127532. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127532.