

На правах рукописи



МЕХАНОШИНА
Екатерина Владимировна

Закономерности формирования внутригодового распределения стока рек
Верхней и Средней Камы в годы разной водности

1.6.16 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ)

Научный
руководитель: **Микова Ксения Дмитриевна**,
кандидат географических наук

Официальные
оппоненты: **Болгов Михаил Васильевич**
доктор технических наук, главный научный
сотрудник, зав. лабораторией моделирования
поверхностных вод Института водных проблем
Российской академии наук

Самохин Михаил Алексеевич
кандидат географических наук,
научный сотрудник кафедры гидрологии суши
географического факультета
Московского государственного университета
имени М. В. Ломоносова

Ведущая
организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
университет» (СПбГУ), Институт наук о Земле

Защита состоится «09» октября 2026 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.049.03 на базе ФГБУН «Институт географии Российской академии наук» по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29 и на сайте Института: <http://igras.ru/defences>.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Отзывы на автореферат (в электронном виде в формате pdf и на бумажных носителях в одном экземпляре, заверенные подписью и печатью) просим направлять по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер, д. 29, ученому секретарю Диссертационного совета 24.1.049.03, Титковой Т.Б.

e-mail: titkova@igras.ru

Ученый секретарь диссертационного
совета, кандидат географических наук

Титкова Т.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Внутригодовое распределение стока (ВГРС) – это распределение величины стока рек 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.

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. Это 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.

Для достижения поставленной цели были решены 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.

Объект исследования – реки водосбора Верхней и Средней Камы.

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

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 значения 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 заблаговременного расчета водности года.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Для рек водосбора Верхней и Средней Камы проведена типизация гидрографов по ВГРС и выявлены закономерности 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 слоя стока весеннего половодья от этих факторов в годы разной водности.

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

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 заблаговременного 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 и апробация 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 том числе:

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. Международной научно-практической конференции, посвященной 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 Всероссийской научно-практической конференции 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.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. В работе 176 страниц, 27 рисунков и 46 таблиц. Библиографический список насчитывает 282 источников, из них 47 на иностранном языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, представлен краткий анализ степени её научной разработанности, определены цель и задачи исследования, охарактеризованы научная новизна и практическая значимость работы. Приведены сведения об исходных материалах и использованных методах исследования, сформулированы основные защищаемые положения, выносимые на защиту, а также указана степень достоверности и апробация результатов работы.

Глава 1. Формирование речного стока.

В первой главе рассмотрена сущность процесса и факторы формирования

речного стока и его внутригодового распределения (**раздел 1.1**), освещена история вопроса, выполнен анализ современного состояния изученности проблемы (**раздел 1.2**).

Первые исследования, посвященные изучению ВГРС, относятся к концу XIX – первой половине XX вв. (Гейнц, 1898; Оппоков, 1906, 1911, 1933; Кочерин, 1929; Львович, 1938; Зайков, 1944 и др.).

Вопросу анализа внутригодового распределения стока рек нашей страны посвящено обширное количество исследований (Андреянов, 1960; Болгов и др., 2018; Девяткова, 1969; Джамалов и др., 2017; Дмитриева, 2011; Евстигнеев и др., 1990; Калинин и др., 2018, 2024; Комлев, 2006; Кузин, 1960; Кузин, Бабкин, 1979; Лукьянович, 2011; Мордовин, 1996; Никитин, 1952; Решетникова и др., 2010; Сванидзе, 1962; Серпик, 1952; Соколовский, 1944; 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. 2022; Георгиади и др., 2013, 2019; Георгиади, Кашутина, 2015; 2016; 2019; Георгиевский и др., 2012, 2019; Джамалов и др., 2014, 2015, 2017; Долгов и др., 2018; 2020; Добровольский, 2011, 2015; Калинин и др., 2022; Киреева и др., 2013, 2017, 2018; Коронкевич и др., 2018; Лавров, Калюжный, 2016; Лурье, Панов, 1999; Магрицкий и др., 2015, 2017, 2018; Мотовилов и др. 2022; Рождественский и др., 1988; Сикан и др., 2023; Сивохиц, Павлейчик, 2024; Фролова и др., 2013, 2014, 2020, 2022; Шикломанов и др., 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, 2020, 2022; Борщ, Христофоров, 2015; Бураков, 1978; Варенцова и др., 2021, 2022; Великанов, 1957; Вершинина, 1974, 1977; Владимирова, 2009; Гарцман и др., 2019, 2023; Гельфан, 2007, 2014, 2015, 2017; Георгиевский, Шаночкин, 2007; Зиновьев, 2014; Лавров, Калюжный; 2016; Миннегалиев, 2018, 2019; Морейдо и др., 2015, 2017, 2020; 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, которые могли бы послужить основой для разработки новых методов и подходов по оценке формирования стока и водности.

Глава 2. Особенности внутригодового распределения стока рек водосбора Верхней и Средней Камы в разные по водности годы.

В главе 2 представлено описание сформированной информационной базы, включающей сведения о природном и хозяйственном состоянии водосбора, гидрологические и метеорологические исходные данные по этому региону и методы исследования.

В разделе 2.1 и 2.2 представлены физико-географическая характеристика водосбора и особенности водного режима рек исследуемой территории.

В разделе 2.3 для реализации поставленных задач приведено описание сформированной **базы исходных данных**, включающей в себя:

1. Ежедневные расходы воды по 49 гидрологическим постам (г/п) за характерные многоводные, средние и маловодные годы. Среднемесячные и среднегодовые расходы воды за многолетний период с момента создания гидрологических постов по 2022 г.

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

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

В рамках настоящего диссертационного исследования предложен уточненный подход к исследованию ВГРС, описание которого приведено в **разделе 2.4**. Подход включает следующие основные положения: выбор характерных по водности лет; типизацию гидрографов; анализ внутригодового распределения стока и районирование исследуемой территории; оценка влияния естественной зарегулированности стока на ВГРС; исследование воздействия основных факторов на формирование стока весеннего половодья; разработка алгоритма заблаговременного расчета определения объема половодья и общей водности года.

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 графоаналитический 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).

Глава 3. Особенности внутригодового распределения стока рек водосбора Верхней и Средней Камы в разные по водности годы.

В разделе 3.1 выполнено исследование ВГРС рек, по комплексным графикам, построенным на основе данных о ежедневных расходах воды для каждого гидрологического поста, а также температуре воздуха и осадках по ближайшей метеостанции. В результате выделены типы гидрографов рек (рис. 1) в годы разной водности (табл. 1) и исследованы закономерности их пространственного распределения по территории (рис. 2).

Таблица 1

Выбор характерных по водности лет

| Группы водности | Годы | Обеспеченность |
|-----------------|--|---|
| Многоводные | 1965, 1971, 1978, 1979, 1984, 1990, 1993, 2002, 2008, 2017, 2019 | для 15 г/п – $P \leq 5\%$, а для 34 г/п – $0,0\% \leq P < 33,3\%$. |
| Средние | 1968, 1972, 1973, 1981, 1983, 2000, 2003, 2004, 2006, 2009 | для 49 г/п – $33,3\% \leq P < 66,7\%$ |
| Маловодные | 1970, 1973, 1975, 1976, 1977, 1982, 1988, 2010, 2011, 2012 | для 32 г/п – $P \geq 95\%$, а для 17 г/п – $67,5\% \leq P < 95\%$ |

На основе анализа условий формирования среднегодового расхода воды в разные по водности годы предложена следующая типизация гидрографов (рис. 1):

1-й тип – высокое и продолжительное весеннее половодье и значительные 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.

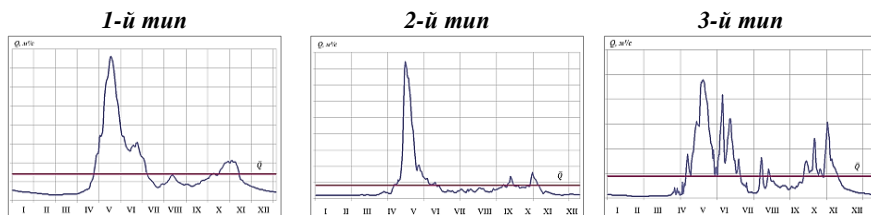


Рис. 1. Характерные типы гидрографов рек водосбора Верхней и Средней Камы:

Критериями отнесения к тому или иному типу являлись: 1) оценка ВГРС по внешнему виду гидрографа (выявление фаз водного режима); 2) количественные критерии – 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 1 или 3 типам).

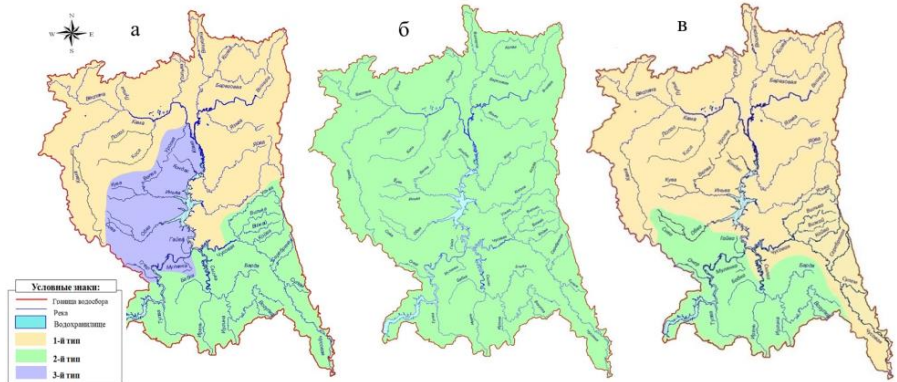


Рис. 2. Пространственное распределение типов гидрографов рек в разные по водности годы: а – схема в многоводные годы; б – схема в средние по водности годы; в – схема в маловодные годы

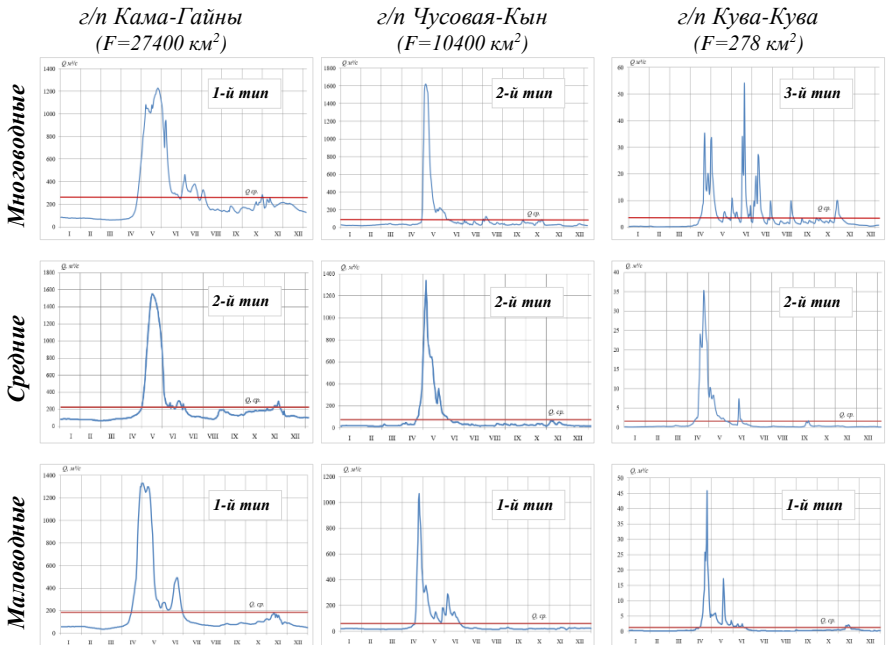


Рис. 3. Разные типы гидрографов на реках водосбора Верхней и Средней Камы

Анализ пространственного распределения разных типов гидрографов за многоводную группу лет показал, что они характерны для рек разных частей исследуемой территории: **1-й тип** – северная и горная часть (реки Кама, Весляна, Лупья, Пильва, Вишера, Колва, Язьва, Яйва, Косьва); **2-й тип** – юго-западная (р. Тулва) и юго-восточная части (реки Сылва, Вогулка, Иргина, Бабка, Ирень, Барда, Чусовая, Сулем, Серебряная, Койва, Усьва); **3-й тип** – центральная часть (реки Уролка, Кондас, Иньва, Кува, Велва, Обва, Очер, Гайва, Мулянка) (рис. 2 а, 3).

Если рассматривать средние по водности годы, то на реках всей исследуемой территории выделяется **2-й тип** гидрографов (рис. 2 б, 3).

В маловодные годы 1-й тип гидрографов наблюдается на реках северной, горной и юго-восточной части, **2-й тип** – юго-западной и юго-восточной части (рис. 2 в, 3). 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 только в многоводные годы на реках центральной равнинной части с площадью водосбора менее 5500 км², где осадки могут охватывать значительную часть площади водосбора с меньшим временем добегания и отсутствуют эффекты сглаживания и аккумуляции стока.

В разделе 3.2 выполнен расчет месячного стока и районирование территории водосбора Верхней и Средней Камы по условиям формирования ВГРС.

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. Среди них чаще всего применяются принципы объективности, территориальной целостности, комплексности, однородности, генетического единства, сочетания зональных и азональных факторов. Для территории водосбора Верхней и Средней Камы существует две схемы гидрологического районирования (рис. 4).

- В изданиях «Ресурсов поверхностных вод» проведена детализация схемы районирования территории, выполненная на основе распределения коэффициента стока (η) и коэффициента естественной зарегулированности (φ) (рис. 4а).

- Схема районирования А.С. Шкляева (1965), где на территории выделяются таксономические единицы с однородными условиями формирования речного стока и режима рек в зависимости от физико-географических условий и различных гидрологических и метеорологических признаков (рис. 4б).

В первом случае обнаружено несоответствие сроков начала, максимума, окончания весеннего половодья и летне-осенних дождевых паводков на

разных реках (рис. 4а, б). Причиной является сильная генерализация районов, связанная с применением карт мелкого масштаба. При использовании схемы районирования А.С. Шкляева в округа попадет очень мало (1-5) центров тяжести водосборов рек, на которых организованы наблюдения за стоком (рис. 4 в, г), что затрудняет проведение анализа ВГРС.

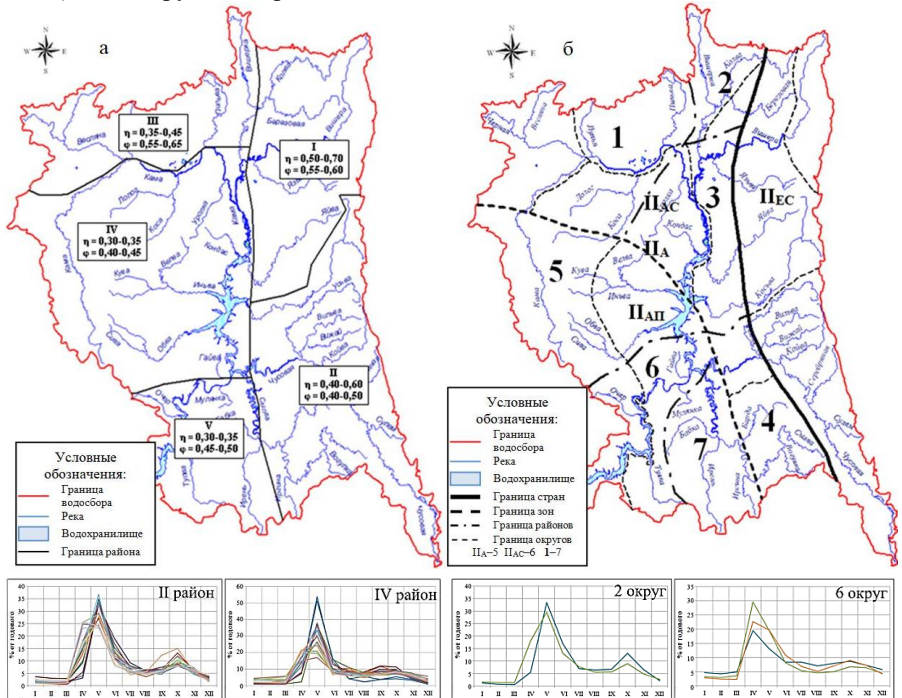


Рис. 4. Схемы гидрологического районирования и внутригодовое распределение стока рек в % от годового: (а) – по Ресурсам..., 1973; (б) – по схеме А.С. Шкляева (1965)

В связи с этим 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. Всего выделено шесть районов (рис. 5).

Рассматриваемая территория по схеме гидрологического районирования относится к двум странам: Уральской горной (II_{ЕС}), занимающей восточные горные районы и Западной Атлантической (II_А), охватывающей остальную территорию. Границы однородных районов проведены по границам водораздельных линий с учетом центров тяжести водосборов.

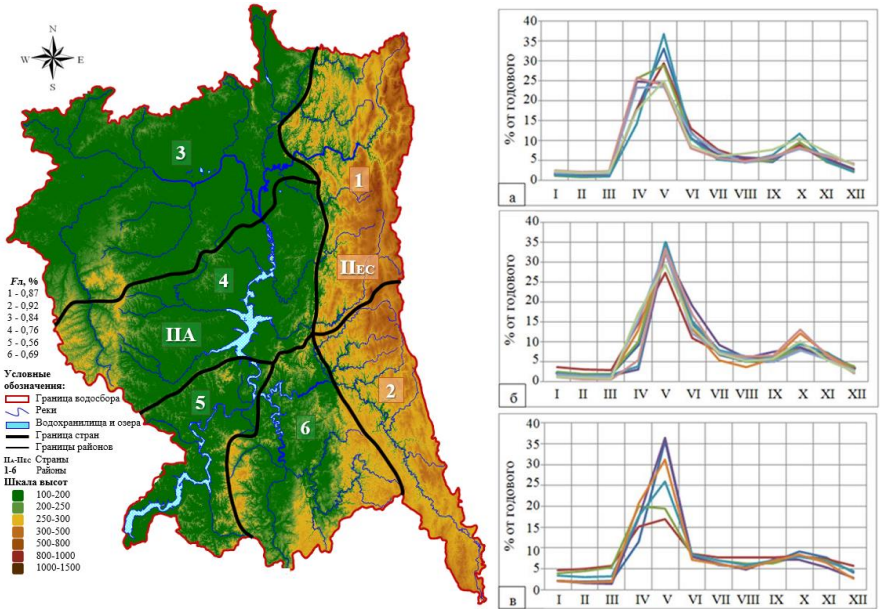


Рис. 5. Схема гидрологического районирования территории на основе ВГРС: а – ВГРС северного равнинного района; б – ВГРС центрального равнинного района; в – ВГРС юго-западного района (Калинин, Механошина и др., 2024)

Полученное гидрологическое районирование можно использовать для подбора рек-аналогов с целью приведения рядов к многолетнему периоду, удовлетворяющему понятию репрезентативности. Одним из основных требований при выборе реки-аналога является однородность физико-географических условий формирования стока, которая учитывается в предложенной схеме гидрологического районирования (рис. 5).

Выполненные расчеты показали, что при использовании схемы районирования в выборе реки-аналога, ошибка вычисленного среднегодового объема воды составила от 5,8 до 9,8%, а без учета схемы районирования – от 25 до 42%, что свидетельствует о справедливости данного подхода.

Дополнительно в **разделе 3.3** был выполнен анализ многолетних изменений сезонного стока (табл. 2).

В целом для рек водосбора Верхней и Средней Камы смена циклов водности в рядах стока в весенний период приходится на 1988–1989 гг., в летне-осенний и зимний сезоны на 1977 г.

Сопоставление величин сезонного стока до и после начала выраженных климатических изменений показало – снижение весеннего стока в среднем по всей территории на 6,6%, и его увеличение в летне-осенний и зимний на 18,0% и 24,0% соответственно.

Таблица 2

Процентное соотношение сезонного стока до и после начала выраженных изменений

| № | Название района | Распределение речного стока по сезонам (в %) | | | | | | Разница между периодами, % | | |
|------|-----------------------|--|------------|-------|---|------------|-------|----------------------------|------------|-------|
| | | до начала выраженных климатических изменений | | | после начала выраженных климатических изменений | | | | | |
| | | 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 разделе 3.4 исследовано влияние естественной зарегулированности стока рек на ВГРС и главную фазу водного режима.

Физико-географическое положение рек водосбора Верхней и Средней Камы обуславливает наличие широтной зональности и высотной поясности. Для исследуемой территории характерна неравномерность распределения стока внутри года. Большая часть годового объема стока приходится на теплую часть года (Ресурсы, 1973).

Одним из показателей неравномерности внутrigодового распределения стока является коэффициент естественной зарегулированности φ , который отражает величину базисного стока и меняется год от года в зависимости от особенностей многоводной фазы водного режима (Соколовский, 1960).

Для анализа неравномерности ВГРС рек водосбора Верхней и Средней Камы за каждый характерный год (табл. 1) были заново рассчитаны значения базисного стока φ и исследованы следующие зависимости: $\varphi = f(F)$, $\text{доля}_{IV-VI} = f(\varphi)$ для разных по размеру водосборов.

Если рассматривать в целом территорию за все по водности годы, 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, что приводит к уменьшению влияния колебаний подземного питания на величину базисного стока. В то же время это увеличение коэффициента (φ) наблюдается до определенных значений площади водосбора (8000-10000 км²). При дальнейшем увеличении площади водосбора коэффициент (φ) меняется незначительно.

На примере многоводных лет это также подтверждается полученными

зависимостями $\varphi = f(F)$ и коэффициентами корреляции 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 отсутствует $r = 0,53$ (табл. 3). Если рассматривать средние и маловодные годы, то для рек водосбора Верхней и Средней Камы выявленные закономерности полностью подтвердились.

Таблица 3

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

Исследование ВГРС в разные по водности годы выявило, что на реках водосбора за период весеннего половодья формируется от 60 до 80% годового стока (табл. 2). Данный период является главной фазой водного режима. Поэтому целесообразно рассмотреть зависимость доли стока за весенний период (IV-VI) от коэффициента естественной зарегулированности стока для разных по размерам водосборов (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты корреляции r зависимости: $\text{доля}_{IV-VI} = f(\varphi)$

| 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 $\text{доля}_{IV-VI} = f(\varphi)$ за многоводную группу лет было выявлено следующее: доля стока за период весеннего половодья обратно пропорциональна величине естественной зарегулированности стока (рис. 6). Это 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.

Полученные результаты для разных по водности групп лет показали, что 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.

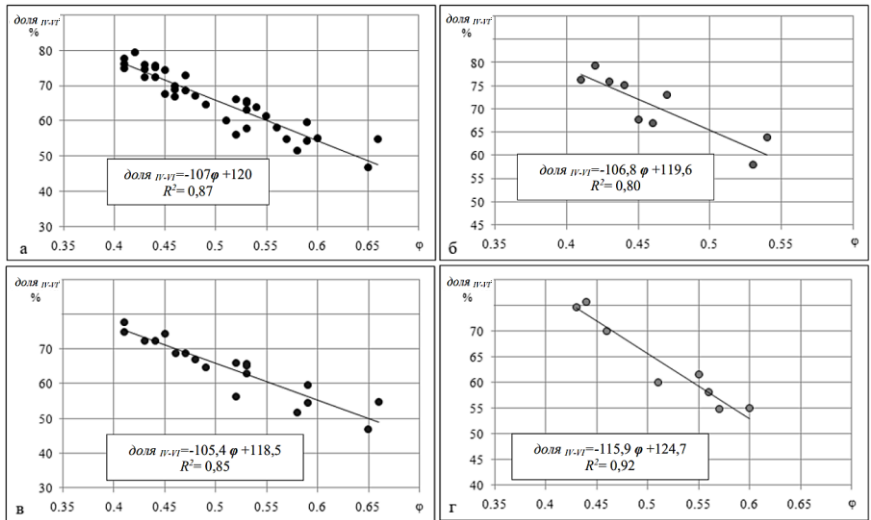


Рис. 6. Зависимость $\text{доля}_{\text{п.п.т.}} = f(\phi)$ за 1993 многоводный год: а – для всех водосборов, б – для водосборов малых рек, в – для водосборов средних рек, г – для водосборов больших рек

Таким образом, за все исследуемые по водности группы лет с увеличением водосборной площади бассейна реки наблюдается увеличение естественной зарегулированности речного стока и, как следствие, уменьшение значения доли стока в весенний период.

Глава 4. Анализ влияния основных факторов на формирование стока весеннего половодья в разные по водности годы.

В разделе 4.1 выполнено детальное исследование особенностей развития главной фазы водного режима в разные по водности годы, а также проанализировано влияние морфометрических характеристик.

Анализ характеристик весеннего половодья показал, что пик фазы приходится на апрель-май. Рост водности на горных водосборах из-за большего уклона 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.

В разделе 4.1.1 проанализировано влияние морфометрических характеристик

на продолжительность весеннего половодья с помощью парных корреляций и коэффициентов множественной регрессии. В качестве факторов, которые оказывают влияние на продолжительность весеннего половодья, исследованы: *площадь водосбора, средняя высота водосбора, уклон главного водотока и средний уклон водосбора.*

Результаты показали, что при использовании одного фактора наилучшая теснота связи получена с площадью водосбора ($r = 0,61-0,90$). При использовании нескольких факторов высокие коэффициенты множественной регрессии для равнинных и горных рек получены от комбинации трех факторов: площади водосбора, среднего уклона водосбора и уклона главного водотока. Для равнинных рек регрессионные модели имеют «очень хорошее» качество ($NSE=0,91-0,92$), у горных рек «хорошее» и «удовлетворительное» качество ($NSE=0,64-0,76$). Средняя ошибка расчета составила 2-4 дня. Таким образом, полученные регрессионные модели хорошо воспроизводят продолжительность весеннего половодья для равнинных и горных рек в годы разной водности.

В разделе 4.2 для оценки влияния основных факторов на формирование стока весеннего половодья в разные по водности годы была рассчитана величина слоя стока весеннего половодья Y (мм), а в качестве основных метеорологических факторов 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 $\sum t_+$ 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; осеннее увлажнение $U_{осенн}$, мм (принималась величина суммы осадков в осенний период до устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C к отрицательным значениям).*

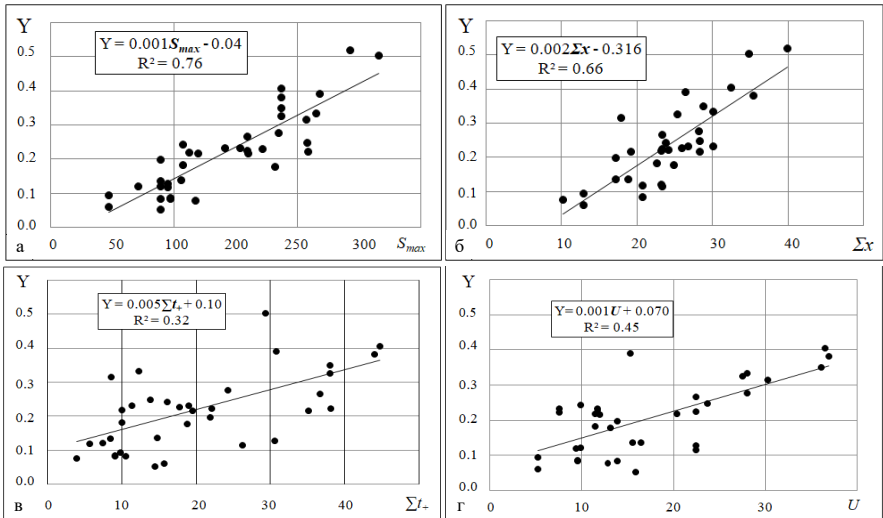
Результаты расчетов за многоводные и маловодные годы показали, что основными факторами в формировании высокого весеннего половодья на реках Верхней и Средней Камы являются максимальный снеготаяния и осадки, выпавшие в период половодья, что прослеживается во все выбранные годы (табл. 5, рис.7). Чем больше 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.

Теснота зависимостей $Y = f(U_{осенн})$ и $Y = f(\sum t_+)$ значительно ниже. Это объясняется тем, что осеннее увлажнение и сумма среднесуточных положительных температур перед началом весеннего половодья оказывают косвенное влияние на величину слоя стока главной фазы. При большом осеннем увлажнении уменьшаются потери воды на инфильтрацию во время снеготаяния. Во втором случае, чем больше сумма накопленных положительных температур воздуха, тем интенсивнее проходит процесс снеготаяния, что приводит к быстрому подъему уровня воды.

Таблица 5

Коэффициенты корреляции r зависимостей слоя стока от основных факторов

| Факторы | Многоводные годы | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1971 | 1978 | 1979 | 1984 | 1986 | 1990 | 1993 | 1994 | 2002 | 2007 | 2008 | 2017 | 2019 |
| S_{max} | 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 |
| $\sum t_+$ | 0,36 | 0,23 | 0,57 | 0,40 | 0,05 | 0,48 | 0,12 | 0,49 | 0,46 | 0,39 | 0,51 | 0,30 | 0,28 |
| $\sum X_{весна}$ | 0,64 | 0,63 | 0,82 | 0,47 | 0,56 | 0,75 | 0,61 | 0,71 | 0,65 | 0,72 | 0,70 | 0,69 | 0,65 |
| $U_{сент}$ | 0,16 | 0,52 | 0,67 | 0,25 | 0,23 | 0,18 | 0,56 | 0,04 | 0,54 | 0,49 | 0,38 | 0,50 | 0,49 |
| $S_{max} \cdot \sum X_{весна}$ | 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 |
| $K = \frac{S_{max} \cdot \sum t_+}{\sum X_{весна} \cdot U_{сент}}$ | 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 |

Рис. 7. Зависимость слоя стока (Y) за период весеннего половодья от основных факторов за многоводный 1979 г.

В средние по водности годы снеготаяние является основным фактором. Сумма положительных температур оказала большое влияние на интенсивное прохождение снеготаяния, короткий период подъема и быстрое наступление максимума весеннего половодья, о чем свидетельствует 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 разделе 4.3 оценена возможность комплексного учета рассматриваемых факторов в формировании стока весеннего половодья. 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 $K = \frac{S_{max} \cdot \sum X_{весна} \cdot U_{сент} \cdot \sum t_+}{\dots}$

который представляет собой произведение этих показателей. Размерность коэффициента $K - ^\circ\text{C} \cdot \text{мм}^3$, т.е. 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. Вместе с тем анализ показал, что добавление косвенных факторов не приводит к значимому увеличению тесноты связи зависимостей.

Глава 5. Разработка алгоритма заблаговременного расчета водности года на основе определения притока воды за весеннее половодье.

Полученные результаты комплексного исследования ВГРС совместно с главной фазой водного режима и факторов ее формирования в многоводные, средние и маловодные годы, дают возможность применять их для оценки водности года на исследуемой территории.

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 (рис. 8). Поэтому оценку водности года возможно выполнить через расчет притока воды за период весеннего половодья в Камское водохранилище.

В разделе 5.1 подробно рассмотрено многолетнее изменение среднемесячного и годового притока воды в Камское водохранилище. Результаты расчетов показали, что во все месяцы (за исключением мая, июня, сентября) прослеживается тренд на увеличение притока, в зимние месяцы (ноябрь–март) тренд оказался значимым ($p > 0,05$). За период с 1978–2022 гг. произошло увеличение притока воды во все сезоны: в период весеннего наполнения на 5 %, в период летне-осенней стабилизации на 17 %, в период зимней сработки на 30 %. Изменения притока в период зимней сработки оказались статистически значимыми. Также произошло 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 %). Совместный анализ цикличности притока воды, температуры воздуха и осадков показал, что объем притока за период зимней сработки имеет схожие циклы со средней температурой воздуха. Для периодов весеннего наполнения и летне-осенней стабилизации выявлена наилучшая скоррелированность циклов притока с осадками. Высокая скоррелированность циклов у периодов зимней сработки $r=0,92$ и летне-осенней стабилизации $r=0,73$. В весенний период скоррелированность циклов ниже $r=0,48$, т.к. на формирование

притока также оказывают влияние другие факторы, существенно изменяющиеся год от года.

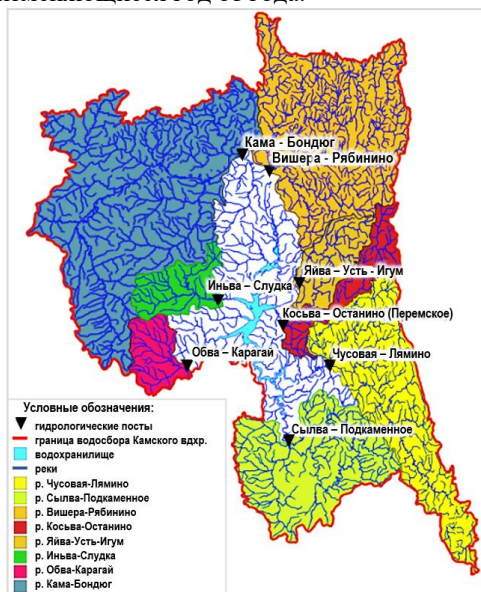


Рис. 8. Местоположение замыкающих створов

В разделе 5.2 предложен алгоритм заблаговременного расчета водности, в основе которого лежит разработка регрессионных моделей объема стока весеннего половодья по 8 замыкающим створам рек, от определяющих факторов за период 1968-2010 гг. и верификацией полученных результатов на независимом материале за период 2011-2022 гг. (рис. 8). Дополнительно рассчитан приток с неосвещенной территории.

Период 1968-2010 гг. прошел проверку на однородность и стационарность, является репрезентативным и включает полный цикл водности, относительная среднеквадратическая погрешность которого составляет менее 10%.

Для расчета объема стока использованы ранее выявленные основные и косвенные факторы, а также дополнительно *осеннее увлажнение* $U_{окт}$, дата начала весеннего половодья ($D_{нач}$) и расход воды на эту дату ($Q_{нач}$).

При построении зависимостей объема стока воды (W) от различных комбинаций факторов, главный фактор, выявленный для каждой группы водности (максимальный снегозапас S_{max}) учитывался в каждой комбинации. Оценка совместного влияния двух факторов выявила, что наилучший результат получен от двух главных факторов: снегозапасов и осадков за весенний период (S_{max} и $\sum X_{весна}$). Коэффициент множественной регрессии становится существенно выше ($R = 0,63-0,82$).

Осадки за период половодья однозначно способствуют увеличению стока рек в эту фазу водного режима, учет которых может существенно улучшить расчет. Определить эту величину на дату расчета (31 марта) невозможно. Использование же средних значений осадков, либо прогноза увлажненности территории может внести в расчет существенную долю неопределённости.

Уточнение моделей, в виде добавления третьего и четвертого факторов, показало, что теснота связей увеличивается только для некоторых водосборов. Таким образом, увеличение количества факторов возможно не для всех водосборов.

Таблица 6

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-Рябино | - | - | - |
| 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 | $W = 0,002 \cdot S_{max} + 0,008 \cdot Q_{нач} + 0,0001 \cdot \Sigma t + 0,003 \cdot \sum x_{весна} - 0,091$ | 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 | Сьлва-Подкаменное (Сьлвенск) | $W = 0,007 \cdot S_{max} + 0,023 \cdot Q_{нач} + 0,004 \cdot U_{окт} + 0,002 \cdot \sum x_{весна} - 0,602$ | 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-Рябино | $W = 0,025 \cdot S_{max} + 0,055 \cdot D_{нач} + 0,003 \cdot U_{сент} - 0,431$ | 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 | Сьлва-Подкаменное (Сьлвенск) | $W = 0,008 \cdot S_{max} + 0,023 \cdot Q_{нач} + 0,002 \cdot U_{сент} - 0,631$ | 0,66 | 79 |

Определение наилучшей комбинации факторов (табл. 6) выполнено с использованием характеристики тесноты связи между переменными (r или R) и критериев качества ($\delta_{ср}$, S/σ , NSE , P). Это позволило для каждого частного водосбора выбрать два вида уравнения связи: с учетом фактора осадков за период весеннего половодья ($\sum x_{весна}$) и без него.

Выбранные уравнения (табл. 6) соответствуют критериям качества (S/σ , P) и использованы для расчета объема стока воды в период весеннего половодья на каждом из 8 частных водосборов. На основе этих расчетов была получена величина притока воды за главную фазу водного режима на Камском водохранилище.

При сравнении фактических значений притока воды с вычисленными, средняя ошибка расчета по уравнениям без осадков в период весеннего половодья составила 1,6%, при этом по уравнению с использованием осадков в половодье – 0,8%. Наибольшие ошибки расчета притока воды были выявлены в многоводные и маловодные годы (до 24%).

Средняя заблаговременность расчета притока в период половодья составила 81 день. Предварительную оценку водности года принято выражать в форме «выше нормы», «соответствует норме» и «ниже нормы». Поскольку до 80% годового стока формируется именно в период весеннего половодья, то зная пограничные значения объема стока воды за этот период, можно определить каким по водности будет год. Для Камского водохранилища за исследуемый многолетний период (1968-2010 гг.) выделены характерные значения объема стока воды за период весеннего половодья для лет разной водности (табл. 7).

Проверка на независимом материале (2011-2022 гг.) результатов расчета в разделе 5.3 по моделям с участием фактора осадков и без участия фактора осадков показала, что рассчитанные величины отличаются незначительно, а точность определения осадков в весенний период низкая. Поэтому для расчета суммарного притока воды за период весеннего половодья рекомендуется использовать уравнения без учета осадков.

Таблица 7

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

| Группа водности | Обеспеченность | Объем стока за половодье, млн куб. км |
|-----------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Многоводная | $P \leq 33,3\%$ | более 35,4 |
| Средняя | $33,4\% \geq P \leq 66,7\%$ | 35,3-28,1 |
| Маловодная | $66,8\% \geq P$ | менее 28,0 |

Средняя ошибка расчета по полученному алгоритму 1,6%, при этом ошибка прогноза по методике, используемой в Уральском УГМС, выше (2,9%).

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.

В Заключении сформулированы основные выводы работы:

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

- 1-й тип – высокое и продолжительное весеннее половодье и значительные 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 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.

2. В пределах исследуемой территории 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. В результате ошибка вычислений искомой характеристики не превысила 9,8%.

3. 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.

4. 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.

5. Основными факторами формирования стока весеннего половодья на реках водосбора Верхней и Средней Камы 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 $K = f(S_{max} \cdot \sum x_{весна} \cdot U_{сент} \cdot \sum t_{+})$

показал, что совместный учет не дает существенного увеличения тесноты связи. Наиболее высокие коэффициенты корреляции получены у зависимостей вида $Y = f(S_{max} \cdot \sum X_{весна})$.

6. На основе комплексного анализа ВГРС и главной фазы водного режима разработан алгоритм расчета водности. Проверка расчетов выполнена на независимом материале и 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 ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из Перечня рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК или индексируемых в системах Scopus, Web of Science:

1) 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. ВАК К1, Белый список 2 уровень.

2) **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. ВАК К2, Белый список 4 уровень.

3) **Механошина Е.В.**, Микова К.Д. Оценка многолетнего изменения сезонного стока рек водосбора Воткинского водохранилища // Региональные геосистемы. – 2025. – Т. 49 №4. – С. 669-683. DOI 10.52575/2712-7443-2025-49-4-0-2. ВАК К2, Белый список 2 уровень.

4) Микова, К.Д., **Механошина Е.В.**, Ромашова Р.Н., Колегов М.В. Многолетнее изменение притока воды в Камское водохранилище // Географический вестник. – 2024. – №. 1(76). – С. 86-98. DOI: 10.17072/2079-7877-2026-1-86-98. ВАК К1, Белый список 2 уровень.

5) V G Kalinin and **E V Mekhanoshina** Analysis of the dependencies of spring flood runoff from the main factors // Modern problems of reservoirs and their catchments. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 321 (2019) 012029 IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/321/1/012029.

6) V G Kalinin, D A Gyrdymov and **E V Mekhanoshina** Changes in the annual and intra-annual river runoff of the Votkinsk reservoir's catchment // 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.

Подписано к печати . .2026 г. Формат 60×84 1/16.
Усл. печ. л. _____. Тираж 100 экз. Заказ № _____.
Типография Пермского государственного университета
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15